



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VÝROBA KRYTU DMYCHADLA

THE PRODUCTION OF COVER BLOWERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Josef Soldán

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michaela Císařová, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Josef Soldán**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Michaela Císařová, Ph.D.**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Výroba krytu dmýchadla

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Tématem práce je studie výroby ochranného krytu dmýchadla.

Cíle bakalářské práce:

Vypracování aktuální literární studie o problematice ohýbání.

Návrh technologického postupu výroby zadané součásti, doplněné o technologické výpočty a vlastní závěry.

Seznam literatury:

BAČA, Jozef, Jozef BÍLIK a Viktor TITTEL. Technológia tvárnenia. Bratislava: Nakladateľstvo STU, 2010. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 978-80-227-3242-0.

FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2006. ISBN 80-214-2374-9.

DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. Technologie tváření: plošné a objemové tváření. Vyd. 4., V Akademickém nakladatelství CERM 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. ISBN 978-80-214-3425-7.

HOSFORD, William F. and Robert CADDEL. Metal Forming: Mechanics and Metalurgy. 4th ed. New York: Cambridge University Press, 2011. ISBN 978-1-107-88-00452-8.

BOLJANOVIC, Vukota. Sheet metal forming processes and Die Desing. New York: Industrial Press, 2004. ISBN 0-8311-3182-9.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

SOLDÁN Josef: Výroba krytu dmyhadla

Práce je zaměřena na návrh výroby krytu dmyhadla z ocelového plechu 1.4541. Na základě literární rešerše, geometrie ohýbaného dílu a velikostí výrobní série byla navržena jako nejvhodnější metoda ohýbání v ohraňovacím stroji. Pro jednotlivé ohyby byla vypočtena ohýbací síla, práce, poloha neutrální vrstvy a velikost odpružení. Dle maximální ohýbací síly byl zvolen vhodný nástroj a lis. Podle polohy neutrální vrstvy byla vypočtena rozvinutá délka. Výše uvedené výpočty byly ověřeny numericky v programu ANSYS pro poslední ohyb.

Klíčová slova: ocel 1.4541, tváření, ohýbání, síla, práce, odpružení, neutrální vrstva, numerická simulace

ABSTRACT

SOLDÁN Josef: The production of cower blowers

This thesis is focused on the production of cower blowers from steel sheet 1.4541. As the best method for producing of this part was selected bending in the bending press. This choice was based on literature review, geometry of bended part and amount of production order. For each bend was calculated bending force, position of the neutral layer and size of the springback. Bending tools and bending press were chosen depending on the biggest bending force from the bends. Developed length of the part was calculated by the position of the neutral layer. All of the above calculations were numerically verified by the ANSYS simulation software for the last bend.

Keywords: 1.4541 steel, forming, bending, force, work, springback, neutral layer, numerical simulation

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SOLDÁN, Josef. *Výroba krytu dmyhadla*. Brno, 2017. 46 s, 2 výkresy, 5 příloh, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojího inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí práce Ing. Michaela Císařová, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V Blansku dne 15.05.2017

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji paní Ing. Michaelle Císařové, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce, dále pak panu Ing. Janu Řiháčkovi za pomoc týkající se numerické simulace a v neposlední řadě také celé své rodině za podporu během studia.

1 OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

2 ÚVOD.....	9
--------------------	----------

3 ROZBOR ZADÁNÍ	10
------------------------------	-----------

4 TECHNOLOGIE OHÝBÁNÍ.....	11
-----------------------------------	-----------

4.1 Definice ohýbání.....	11
---------------------------	----

4.2 Napjatost a deformace v místě ohybu.....	11
--	----

4.3 Neutrální vrstva.....	15
---------------------------	----

4.4 Minimální poloměr ohybu	16
-----------------------------------	----

4.5 Maximální poloměr ohybu.....	17
----------------------------------	----

4.6 Odpružení.....	18
--------------------	----

4.7 Anizotropie materiálu	19
---------------------------------	----

4.8 Síla	21
----------------	----

4.9 Práce.....	22
----------------	----

4.10 Materiály vhodné pro tváření.....	23
--	----

4.11 Metody ohýbání	23
---------------------------	----

4.12 Technologická příprava výroby	28
--	----

5 NÁVRH ŘEŠENÍ.....	31
----------------------------	-----------

5.1 Kontrola technologičnosti.....	32
------------------------------------	----

5.2 Výpočet rozvinuté délky	32
-----------------------------------	----

5.3 Výpočet délky dráhy ohybníku.....	33
---------------------------------------	----

5.4 Výpočet ohýbací síly a práce	34
--	----

5.5 Volba stroje a nástroje	34
-----------------------------------	----

5.6 Výpočet úhlu odpružení.....	35
---------------------------------	----

5.7 Technologický postup výroby	35
---------------------------------------	----

6 NUMERICKÁ SIMULACE PRŮBĚHU OHÝBÁNÍ.....	38
--	-----------

6.1 Geometrický model.....	38
----------------------------	----

6.2 Materiálový model.....	39
----------------------------	----

6.3 Výsledky	41
--------------------	----

6.4 Návrh experimentálního ověření	44
--	----

7 ZÁVĚRY.....	46
----------------------	-----------

Seznam použitých zdrojů

Seznam obrázků

Seznam tabulek

Seznam použitých symbolů a zkratek

Seznam příloh

2 ÚVOD [1], [2], [3], [4]

Již od nedávna se lidstvo zabývá výrobou všemožných nástrojů a od doby průmyslové revoluce i složitých a komplexních strojů. Velkou roli přitom zastává tzv. tváření, kde je polotovar donucen ke změně tvaru působením vnějších sil.

Jeho neopomenutelnou výhodou je úspora materiálu (nevzniká odpad, nebo jen minimum v porovnání s třískovým obráběním) a mechanické vlastnosti výsledného výrobku.

Jednou z možných nevýhod může být vysoká cena za tvářecí nástroje a stroje, především objemové tváření je z důvodu vyšších nákladů vhodné pro sériovou a velkosériovou výrobu.

Tváření lze tedy rozdělit na objemové (mění se objem polotovaru) a plošné (z plošného polotovaru se vytváří trojrozměrný díl).

Příkladem prvního objemového tváření budiž ražení mincí, kování šperků a zbraní, které souvisí se vznikem prvních států (viz obr. 1). Plošné tváření se v masovém měřítku začalo využívat během průmyslové revoluce, například zakružování plášťů parních kotlů, tváření částí trupu lodí, ohýbání kolejnic.

Dnes se s plošným tvářením lze setkat téměř všude, například karoserie auta (viz obr. 3), skříň počítače (viz obr. 2), kabina a dveře výtahu, kryt televize, regály v obchodě, pánve a hrnce na vaření. Jedná se tedy o často používané věci, na které mohou být kladeny různé nároky, ať už estetické, případně funkční a zdravotně nezávadné, kdy je například nežádoucí, aby se z hrnců uvolňovaly do potravin nebezpečné látky, proto se u těchto výrobků používá tzv. potravinářská ocel, která je zdravotně nezávadná.



Obr. 1 Athénská mince, 449–404 př. n. l. [1]



Obr. 2 Počítačová skříň [3]



Obr. 3 Karoserie automobilu [4]

3 ROZBOR ZADÁNÍ [5]

Cílem práce je návrh technologického postupu výroby ochranného krytu dmyhadla (viz obr. 4) při uvažované sérii 100 ks/rok, doplněný o aktuální literární studii problematiky ohýbání.

Dle požadavku zákazníka bude použit materiál 1.4541. Jedná se tedy o austenitickou, žáruvzdornou (do 850 °C) a korozivzdornou (do 400 °C) ocel, odolnou proti atmosférickým vlivům, vhodnou ke svařování. Nevýhodou je, že tvářením za studena klesá odolnost materiálu vůči korozi.

Z důvodu malé série zadané součásti není ekonomicky výhodné sestavovat komplexní jednoúčelovou výrobní linku pro výrobu dané součásti. Místo toho bude použit ohraňovací lis a ohýbání bude probíhat tzv. ohraňováním.

Postup výroby bude následující:

- a) vypálení základní kontury součásti včetně otvorů pomocí laseru,
- b) zvýšení přesnosti otvorů tzv. vyhrubováním,
- c) ohýbání ohraňováním dle technologického postupu,
- d) kontrola,
- e) balení a expedice.



Obr. 4 Kryt dmyhadla

4 TECHNOLOGIE OHÝBÁNÍ

4.1 Definice ohýbání [6], [7]

Ohýbání je technologický proces plošného tváření, při kterém se působením vnějších sil na polotovar vyvolá trvalá deformace a vytváří se oblá hrana (plocha). Výsledným produktem ohýbání je ohybek (výlisek).

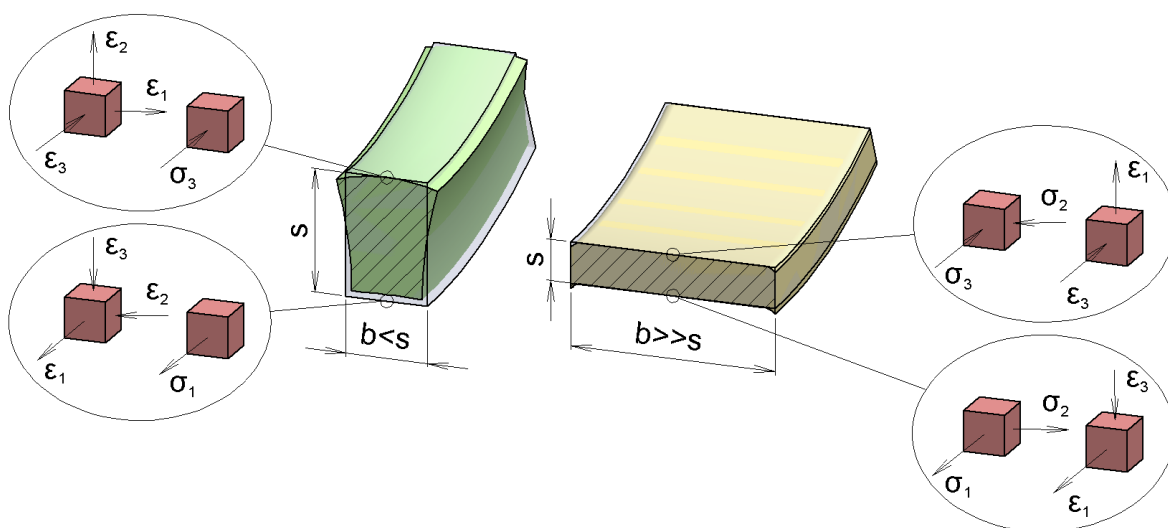
4.2 Napjatost a deformace v místě ohybu [6], [8], [9]

Z hlediska napětí a deformace lze ohýbání rozdělit na:

- ohýbání tyčí,
- ohýbání širokých pásů.

U ohýbání tyčí, kde šířka b je menší, než tloušťka s je možno napětí ve směru šířky σ_2 zanedbat (viz obr. 5). Je tu však patrná změna šířky. Na tlakové straně se šířka zvětšuje a na tahové straně zmenšuje. Dochází k trojosé deformaci.

Ohýbání širokých pásů, kde $b \geq 3s$ je charakteristické nenulovým napětím ve směru šířky σ_2 , ale na rozdíl od ohýbání tyčí dochází pouze ke dvojosé deformaci. Deformace ve směru šířky ε_2 je rovna nule¹.

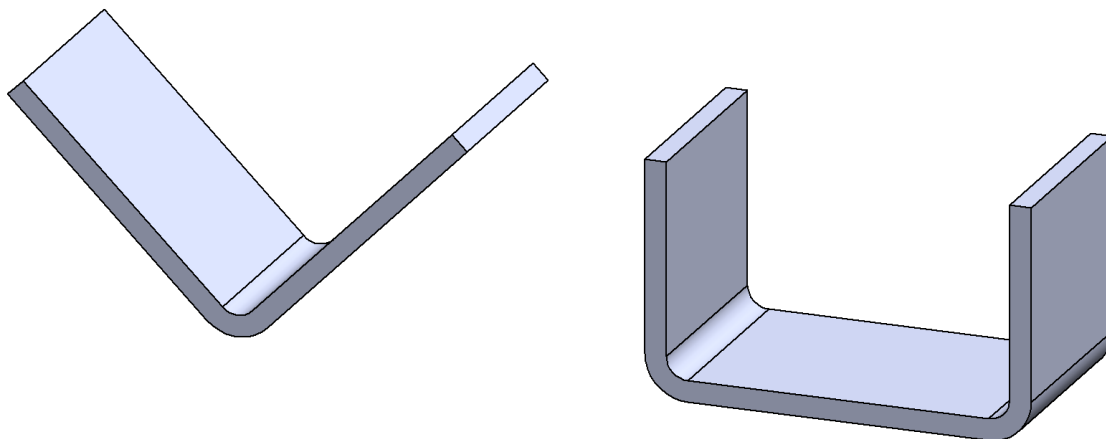


Obr. 5 Schéma napjatosti a deformace při ohybu tyčí a širokých pásů [6], [8], [9]

Další možností rozdělení je podle tvaru výsledného ohybu (viz obr. 6) na:

- ohýbání do tvaru „V“,
- ohýbání do tvaru „U“.

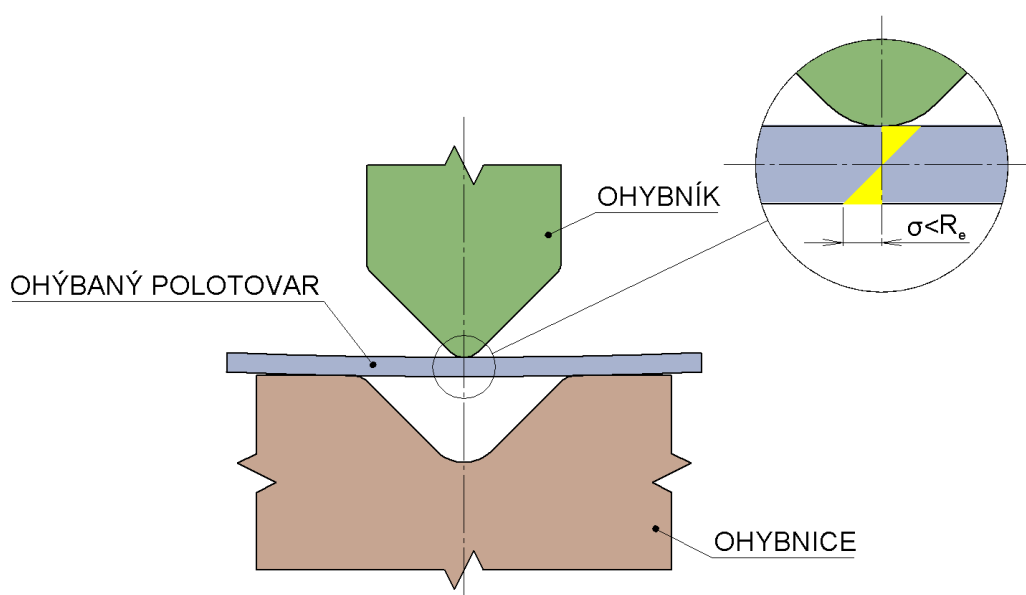
¹ Ve skutečnosti i u širokého pásu lze pozorovat deformaci ve směru šířky v místě hrany ohybu, tato deformace je ale vzhledem k celkové šířce zanedbatelná.



Obr. 6 Ohyb do tvaru „V“ a „U“

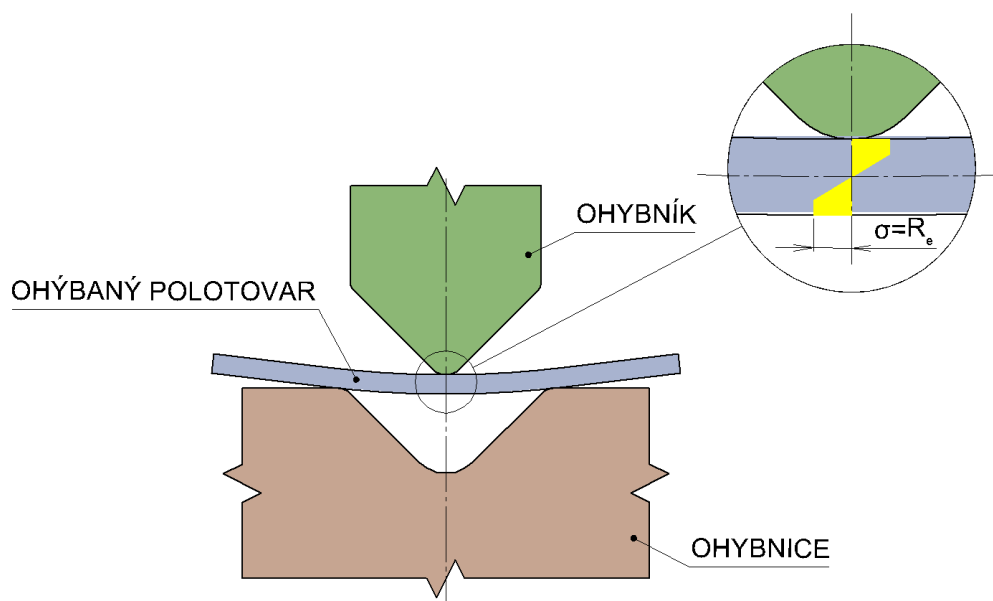
4.2.1 Průběh napětí v jednotlivých fázích ohýbání [6], [8], [10], [11], [12]

Během počáteční fáze ohýbání se v místě styku ohybníku s polotovarem zvyšuje napjatost σ a vzniká elastická deformace. Na vnitřní straně ohybu je napjatost tlaková a na vnější straně tahová (viz obr. 7). V tomto okamžiku platí zásady lineární mechaniky. Pokud by byl v této fázi polotovar odlehčen, tzn. ohybník by přestal působit na ohýbaný polotovar silou, ohýbaný polotovar by se vrátil zpět do původního (nedeformovaného) stavu.



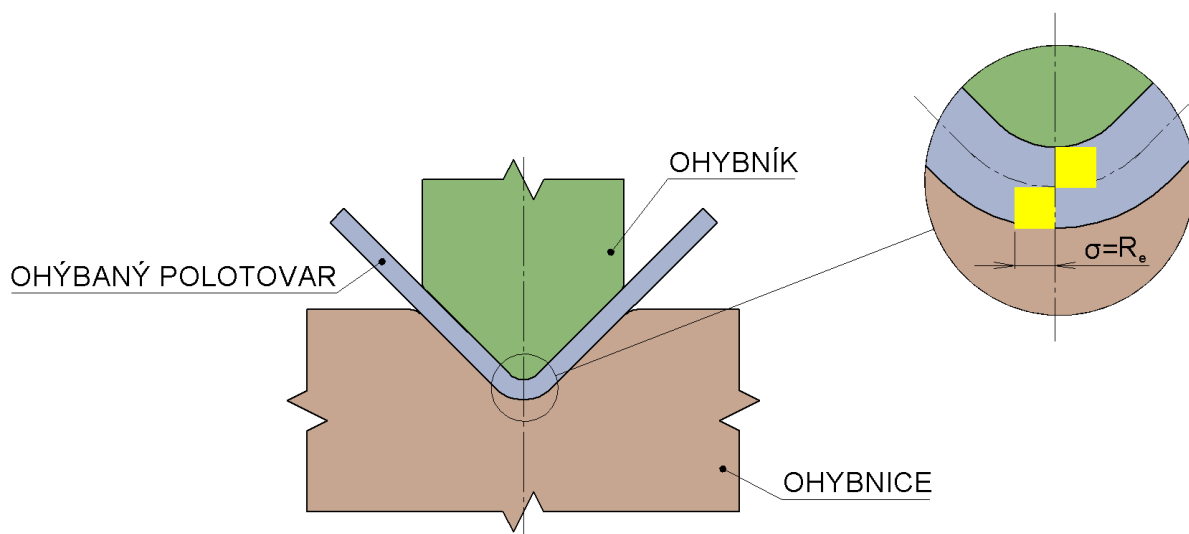
Obr. 7 Teoretický průběh napětí v počáteční fázi ohybu [6], [8], [9], [12]

Pokud se bude dále zvyšovat síla ohybníku na polotovar, napjatost v krajních vláknech dosáhne meze kluzu R_e . V této fázi začne v místech nejvyššího napětí docházet k pružnoplastické deformaci, která je nevratná (viz obr. 8).



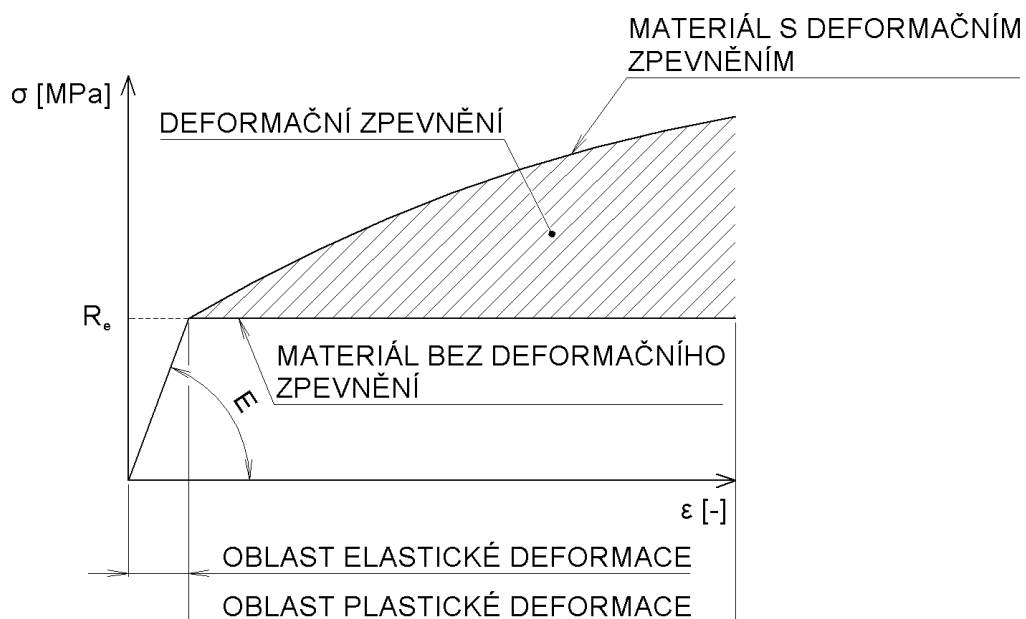
Obr. 8 Teoretický průběh napětí ve druhé fázi ohybu [6], [8], [9], [12]

Dalším zvyšováním síly se bude zvyšovat i oblast pružnoplastické deformace a začne se vytvářet hrana ohybu. Na konci ohýbání (viz obr. 9) polotovar kopíruje tvar ohybníku a ohybnice a v pozorovaném místě je vysoký podíl pružnoplastické deformace vyjma místa blízkého neutrální vrstvě (viz kapitola 4.3).

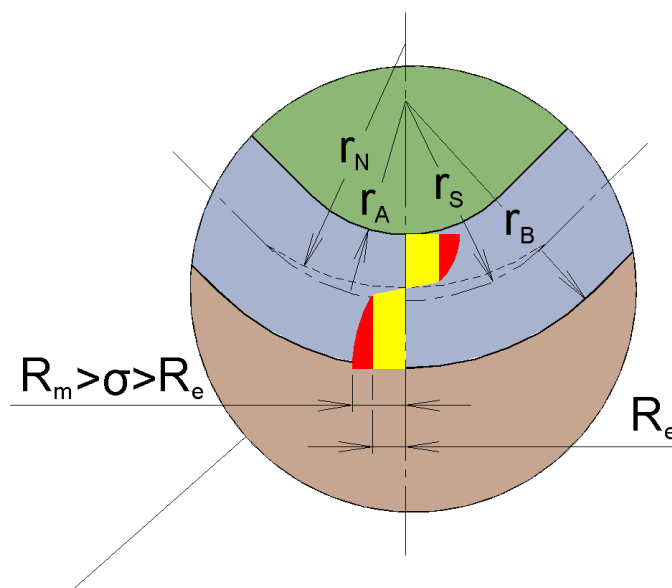


Obr. 9 Teoretický průběh napětí v konečné fázi ohybu [6], [8], [9]

Výše uvedené průběhy napětí nezohledňují zpevnění materiálu, které se projevuje potřebným růstem napětí pro pokračující plastickou deformaci materiálu (viz obr. 10). Skutečný průběh napětí zobrazuje obr. 11.



Obr. 10 Tahový diagram s vyznačeným deformačním zpevněním [11]



Obr. 11 Skutečný průběh napětí v konečné fázi ohybu [6], [8], [9]

Jestliže napjatost v krajních vláknech (převážně na vnější straně ohybu r_B) dosáhne meze pevnosti R_m (viz obr. 11), dojde k tzv. meznímu stavu lomu. Vlivem anizotropie materiálu (viz kapitola 4.7) a teploty dochází k výše uvedenému meznímu stavu za různých podmínek. Polotovary ohýbané kolmo na směr vláken vykazují vyšší odolnost vůči lomu a mají i lepší mechanické vlastnosti než polotovary ohýbané rovnoběžně se směrem vláken.

Z konstrukčního hlediska je třeba brát v potaz, že během samotného ohýbání se mohou v materiálu objevit mikrotrhliny, které jsou koncentrátory napětí a tím snižují statickou únosnost a dynamickou životnost² součástí.

² Počet zátěžných cyklů, během kterých dochází ke stabilnímu šíření trhliny do té doby, než dosáhne kritické délky a dojde k nestabilnímu šíření, tedy lomu.

4.3 Neutrální vrstva [6], [8], [13]

Neutrální vrstva, nebo také neutrální osa, se nachází na rozhraní tahového a tlakového napětí. Na obrázku výše je poloměr vrstvy označen r_N . Je charakteristická nulovým napětím ve směru délky polotovaru (tečným napětím) a její délka zůstává během ohýbání konstantní, což se využívá pro stanovení tzv. rozvinuté délky polotovaru (viz kapitola 4.12.1). Poloha (poloměr) neutrální vrstvy je závislá na materiálu polotovaru a na vnitřním poloměru r_A . Se snižujícím se poloměrem r_A se neutrální vrstva přesunuje ze středu ohybu r_S směrem k vnitřní hraně r_A .

V odborné literatuře i z různých zdrojů na internetu se poloměr neutrální vrstvy r_N vypočítá pomocí vztahu:

$$r_N = r_A + x \cdot s \quad [\text{mm}] \quad (1)$$

kde: x – koeficient posunutí neutrální vrstvy (někdy také označován k [k-faktor]) [-]
 r_A – vnitřní poloměr ohybu [mm],
 s – tloušťka ohýbaného polotovaru [mm].

Koeficient posunutí neutrální vrstvy x se stanovuje z tabulek, jehož hodnoty jsou různé podle použitého literárního zdroje. Příklady těchto tabulek jsou uvedeny v příloze 1.

4.3.1 Přibližný výpočet koeficientu x podle Jozefa Bači [6]

Dle této literatury lze koeficient x i přibližně vypočítat podle následujícího vztahu:

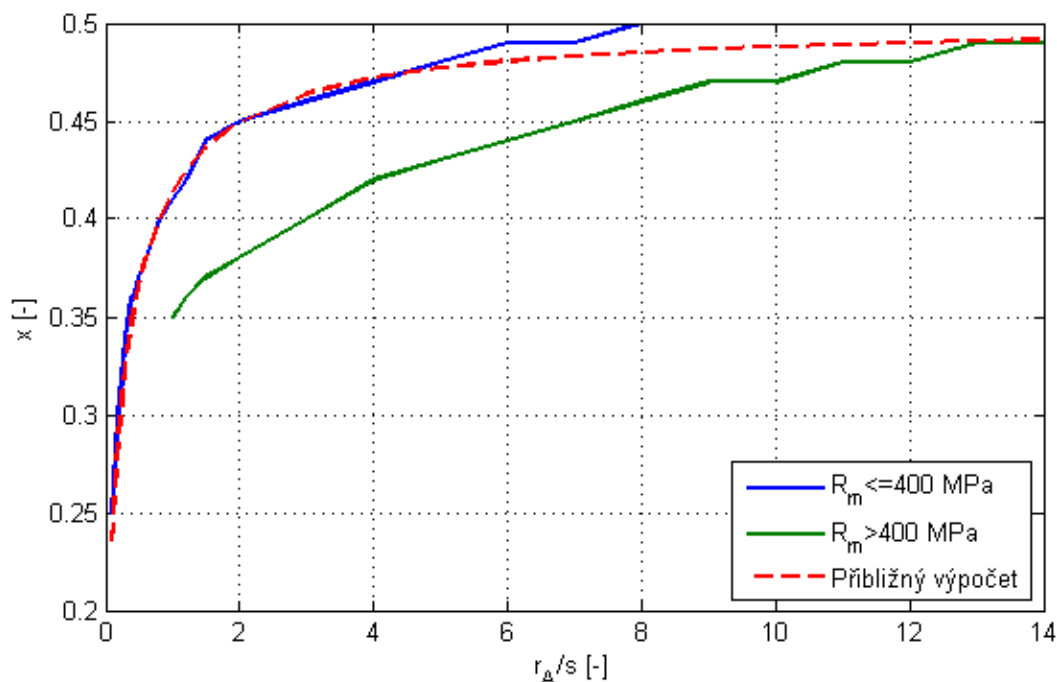
$$r_N = \sqrt{r_B \cdot r_A} \quad [\text{mm}] \quad (2)$$

kde: r_B – vnější poloměr ohybu [mm].

Pro vyjádření koeficientu x lze využít rovnice (1) a (2). Je obdržen následující vztah:

$$\begin{aligned} \sqrt{r_B \cdot r_A} &= r_A + x \cdot s \\ \sqrt{r_B \cdot r_A} &= r_A + x \cdot (r_B - r_A) \\ \sqrt{r_B \cdot r_A} - r_A &= x \cdot (r_B - r_A) \\ x &= \frac{\sqrt{r_B \cdot r_A} - r_A}{r_B - r_A} \quad [-] \end{aligned} \quad (3)$$

Obrázek 12 porovnává tabulkové hodnoty s výpočtem dle rovnice (3).



Obr. 12 Graf závislosti koeficientu x na poměru r_A/s podle pevnosti materiálu (R_m) nebo přibližného výpočtu

4.4 Minimální poloměr ohybu [6], [8], [9], [14], [15]

Minimální poloměr ohybu r_{Amin} udává minimální hodnotu poloměru r_A , při které nedojde k meznímu stavu lomu (viz kapitola 4.2.1). Pro výpočet r_{Amin} se vychází z maximální tečné poměrné deformace krajních vláken ε_{tmax} , jež je dána vztahem:

$$\varepsilon_{tmax} = \frac{l_B - l_N}{l_N} = \frac{r_B \cdot \alpha - r_N \cdot \alpha}{r_N \cdot \alpha} = \frac{r_B - r_N}{r_N} = \frac{r_{Amin} + s - r_N}{r_N} \quad [-] \quad (4)$$

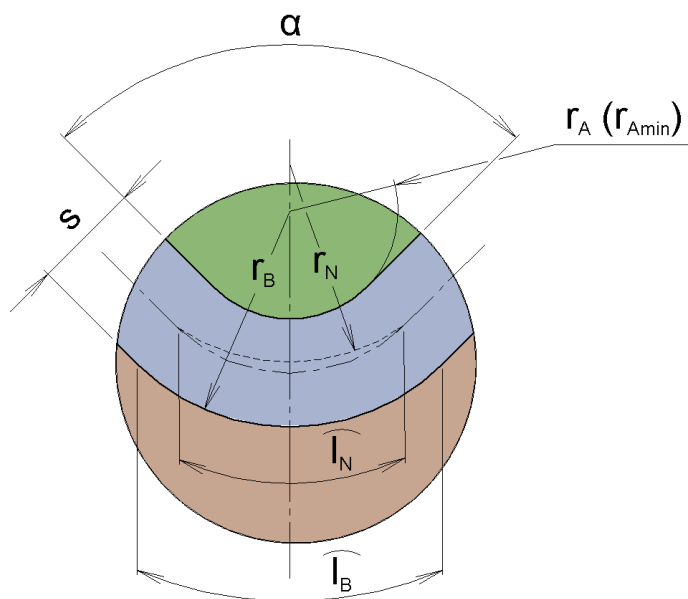
kde: l_B – délka vnější vrstvy ohybu [mm],
 l_N – délka neutrální vrstvy ohybu [mm],
 r_{Amin} – minimální poloměr ohybu [mm],
 α – úhel ohybu [rad].

Výše uvedené veličiny jsou zakótovány v obrázku 13.

V odborné literatuře se z rovnice (4) vyjadřuje r_{Amin} za podmínky $r_N = r_{Amin} + \frac{s}{2}$. Tím se obdrží:

$$r_{Amin} = \frac{s}{2} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_{tmax}} - 1 \right) = c \cdot s \quad [\text{mm}] \quad (5)$$

kde: ε_{tmax} – maximální tečná poměrná deformace v krajních vláknech ohybu [-],
 c – technologický koeficient závislý na druhu ohýbaného materiálu (viz příloha 2) [-].



Obr. 13 Parametry ohybu pro určení r_{Amin} [6], [8]

V případech, kdy neznáme ε_{tmax} lze místo něj použít tažnost A , jež je materiálovou charakteristikou.

Pokud se bude r_{Amin} určovat na základě koeficientu c , je třeba vyhledat jeho hodnotu v tabulkách, které jsou sestavovány experimentálně pro různé druhy ohýbaného materiálu a mohou se od sebe lišit, navíc se koeficient mění v závislosti na deformačním zpevnění (viz kapitola 4.2.1) a anizotropií materiálu (viz kapitola 4.7). Ukázky tabulek jsou uvedeny v příloze 2.

4.5 Maximální poloměr ohybu [6], [8], [9], [15]

Maximální poloměr ohybu r_{Amax} udává maximální hodnotu poloměru r_A , při které nastává první plastická deformace v krajních vláknech ohybu. V případě, kdy $r_A > r_{Amax}$ dojde po uvolnění vnějšího zatížení k odpružení a polotovar se vrátí do původního stavu (viz kapitola 4.2.1). Pro výpočet r_{Amax} se vychází analogicky jako v kapitole 4.4. ze vztahu (4):

$$\varepsilon_{tmin} = \frac{r_{Amax} + s - r_N}{r_N} \quad [-] \quad (6)$$

kde: ε_{tmin} – minimální tečná poměrná deformace v krajních vláknech ohybu [-],
 r_{Amax} – maximální poloměr ohybu [mm].

U výpočtu maximálního poloměru r_{Amax} se neuvažuje vliv posuvu neutrální vrstvy r_N , neboť k první plastické deformaci dochází již za podmínky $r_A/s > 10$.

Vyjádřením r_{Amax} z rovnice (6) za podmínky $r_N = r_{Amax} + \frac{s}{2}$ a následnou úpravou se obdrží:

$$r_{Amax} = \frac{E \cdot s}{2 \cdot R_e} \quad [\text{mm}] \quad (7)$$

kde: E – Youngův modul [GPa],
 R_e – napětí na mezi kluzu [MPa],

což je vztah podle Jozefa Bači.

Dle Milana Forejta lze maximální poloměr ohybu vypočítat podle vztahu:

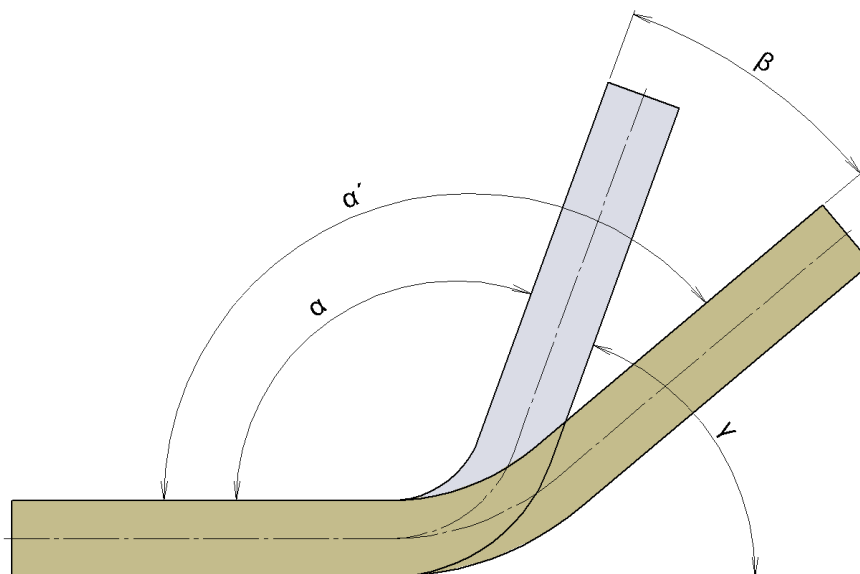
$$r_{Amax} = \frac{s}{2} \cdot \left(\frac{E}{R_e} - 1 \right) \quad [\text{mm}] \quad (8)$$

4.6 Odpružení [6], [8], [13], [14], [15]

Odpružení je častým jevem tváření za studena. Vzniká z důvodu přítomnosti elastické deformace v blízkosti neutrální vrstvy (viz. kapitola 4.2). Tato deformace vyvolá po odlehčení ohybový moment, který se snaží ohýbaný polotovar narovnat zpět (viz obr. 14).

Velikost odpružení ovlivňuje:

- napětí na mezi kluzu R_e ohýbaného dílu,
- metoda ohýbání (viz kapitola 4.11),
- poloměr ohybu r_A ,
- anizotropie (viz kapitola 4.7).



Obr. 14 Odpružení po ohybu [6], [8], [15]

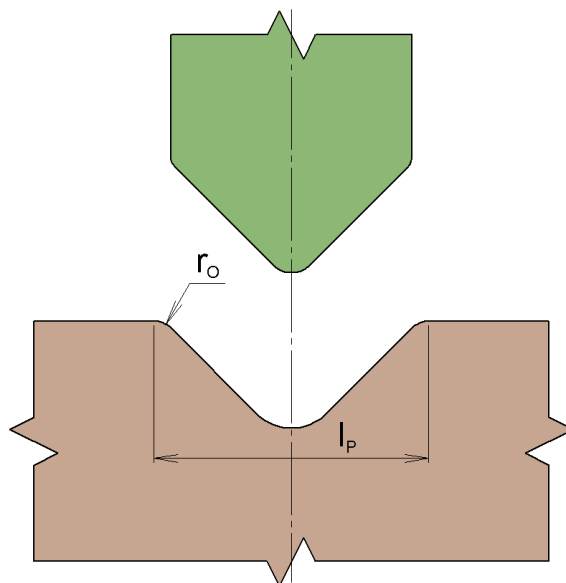
Úhel odpružení β lze zjistit výpočtem, případně odečtem z tabulky či grafu. V podkapitolách níže jsou uvedeny postupy určení jeho velikosti dle použitého zdroje.

Odpružení je možno odstranit zvýšením úhlu ohybu α o velikost odpružení β , nebo pomocí tzv. kalibrace, při které dojde ke zvýšení lisovací síly na konci ohýbání, čímž dochází v místě ohybu k plastické deformaci a snižování velikosti odpružení. Výpočet kalibrovací síly je uveden v kapitole 4.8.3.

a) Určení úhlu odpružení β podle Jozefa Bači [6]

$$\beta = \tan^{-1} \left(0,0375 \cdot \frac{l_p}{(1-x) \cdot s} \cdot \frac{R_e}{E} \right) \quad [\text{rad}] \quad (9)$$

kde: l_p – vzdálenost mezi podporami [mm] (viz obr. 15).



Obr. 15 Parametry ohybnice [6]

b) Určení úhlu odpružení β podle Ivany Suchyové [13]

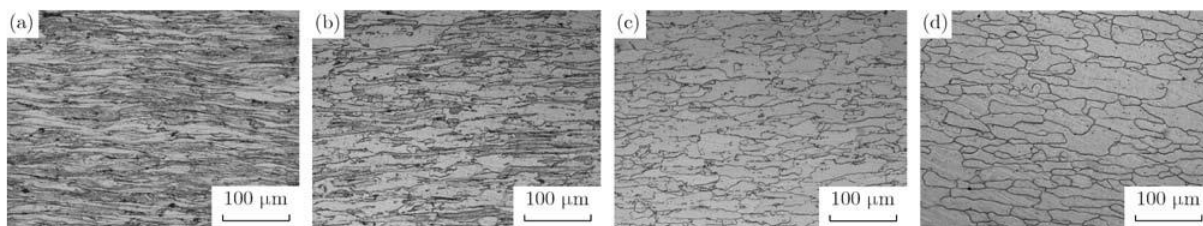
Tab. 1 Úhel odpružení β pro ocel podle Ivany Suchyové

α	Tepelné zpracování polotovaru	r_A/s				
		1	2	4	6	10
150°	Žiháno	1°	1°	3°	4°	7°
150°	Kaleno	0°	2°	5°	8°	14°
120°	Žiháno	0°	1°	2°	3°	5°
120°	Kaleno	0°	1°	3°	5°	8°
90°	Žiháno	0°	0°	1°	2°	4°
90°	Kaleno	-1°	0°	2°	3°	7°
60°	Žiháno	-1°	0°	0°	1°	3°
60°	Kaleno	-1°	0°	1°	2°	4°

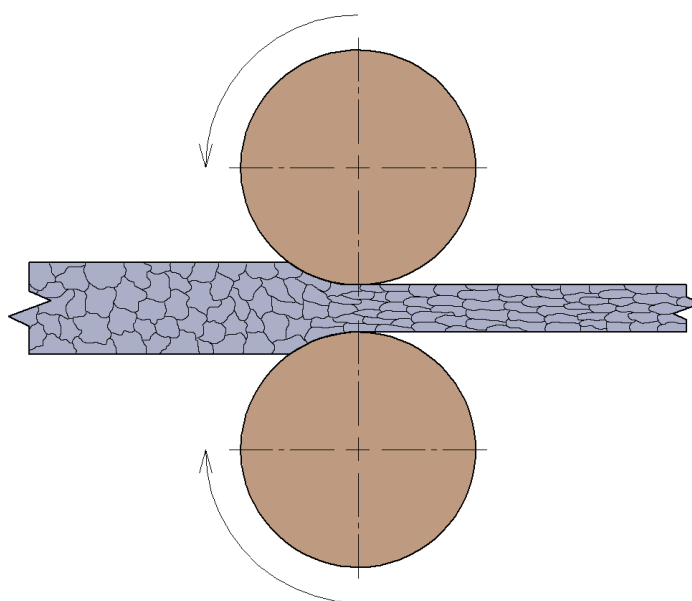
4.7 Anizotropie materiálu [7], [9], [12], [16], [17], [18]

Anizotropie se projevuje změnou mechanických vlastností materiálu v různých směrech zatěžování (viz obr. 18). Je způsobena deformací zrn v důsledku tváření za studena (např. válcováním) (viz obr. 16 a obr. 17). V některých případech může vznikat i při tváření za tepla.

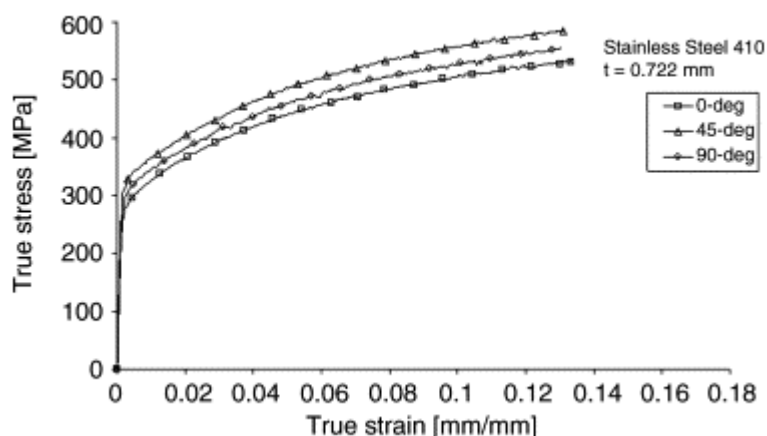
Možností, jak obnovit původní izotropní vlastnosti materiálu a odstranit deformační zpevnění po předchozím tváření je rekrystalizační žíhání (viz obr. 16), při kterém dochází k ohřevu³ a následné prodlevě na dané teplotě (1 – 5 hodin).



Obr. 16 Mikrostruktura válcovaného plechu za studena (a), 60% rekrystalizace na teplotě 580 °C (b), kompletní rekrystalizace na teplotě 620 °C (c), růst zrn při 680 °C po dobu 10 hodin (d) [17]



Obr. 17 Deformace zrn materiálu v důsledku válcování [7]



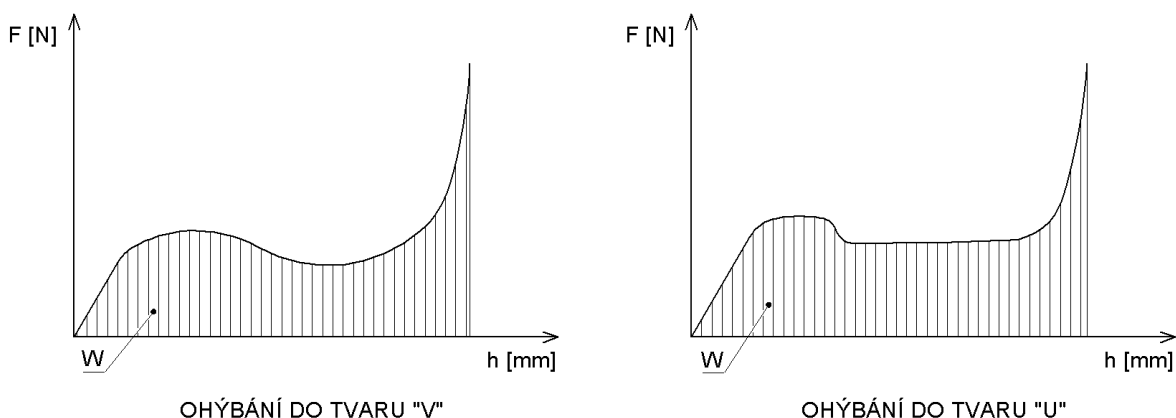
Obr. 18 Graf závislosti napětí na poměrné deformaci anizotropního materiálu zatěžovaného pod úhlem 0°, 45° a 90° [18]

³ (550 – 700) °C u polymorfních ocelí, u nepolymorfních ocelí feritických kolem 800 °C a u austenitických ocelí až 1100 °C

S vlivem anizotropie je třeba počítat při výpočtu minimálního poloměru r_{Amin} nebo úhlu odpružení β . Jelikož většina ohýbaných dílů má kombinované ohyby ve všech směrech, je třeba volit kompromis a polotovár vhodně natočit tak, aby ohyb nebyl rovnoběžný se směrem vláken (viz. kapitola 4.12.3).

4.8 Síla [6], [7], [14]

Výpočet ohýbací síly $F_{V/U}$ je podstatný z důvodu volby vhodného lisu a nástroje, na kterém se bude daný polotovár ohýbat. Jednotlivé výpočty její velikosti se odlišují podle použitého zdroje a tvaru ohybu. Pro všechny je ale společný základ výpočtu vycházející z rovnosti ohybového momentu vnějších a vnitřních sil. Standardní tvar závislosti ohýbací síly na dráze ohybníku při ohýbání do tvaru „V“ a „U“ zobrazuje obr. 19.



Obr. 19 Závislost síly na dráze ohybníku při ohýbání do tvaru „V“ a „U“ [6]

4.8.1 Výpočet maximální ohýbací síly podle Jozefa Bači [6]

Maximální síla při ohýbání do tvaru „V“:

$$F_V = \frac{b \cdot s^2}{l_p} \cdot R_m \cdot C \quad [\text{N}] \quad (10)$$

kde: F_V – maximální ohýbací síla při ohýbání do tvaru „V“ [N],
 C – Caliho konstanta [-] – zohledňuje, že při ohýbání nedochází pouze k jednoosému stavu napjatosti a zohledňuje vliv třecí síly. Při ohýbání do tvaru „V“ nabývá hodnot 1,15 – 1,45 a 1,6 – 1,8 při ohýbání do tvaru „U“.

Maximální síla při ohýbání do tvaru „U“:

$$F_U = \frac{b \cdot s^2}{2 \cdot l_p} \cdot R_m \cdot C \quad [\text{N}] \quad (11)$$

kde: F_U – maximální ohýbací síla při ohýbání do tvaru „U“ [N].

4.8.2 Výpočet maximální ohýbací síly podle Vukoty Boljanoviče [14]

Podle této literatury je možno ohýbací sílu pro ohýbání do tvaru „V“ (při uvažování pružnoplastické deformace) vypočítat dvěma způsoby a to:

a) pokud $\frac{r_A}{s} + \frac{1}{2} \in \langle 5; 200 \rangle$:

$$F_V = \frac{R_e \cdot b \cdot s^2}{l_P - 2 \cdot (r_O + r_A + s) \cdot \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right)} \cdot \left(\cos\left(\frac{\gamma}{2}\right)\right)^2 \quad [\text{N}] \quad (12)$$

kde: γ – doplňkový úhel ohybu ($\gamma = 180 - \alpha$) [°] (viz obr. 14),
 r_O – poloměr zaoblení hran ohybnice [mm],

b) pokud $\frac{r_A}{s} + \frac{1}{2} \notin \langle 5; 200 \rangle$:

$$F_V = \frac{\frac{R_e \cdot b}{3} \cdot \left[3 \cdot s^2 - \left(\frac{2 \cdot R_e \cdot r_N}{E} \right)^2 \right]}{l_P - 2 \cdot (r_O + r_A + s) \cdot \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right)} \cdot \left(\cos\left(\frac{\gamma}{2}\right)\right)^2 \quad [\text{N}] \quad (13)$$

4.8.3 Kalibrovací síla [6], [7]

Kombinace ohýbání s kalibrováním se často využívá ke snížení velikosti odpružení a zvýšení přesnosti ohýbané součásti. Její velikost je stejná pro ohýbání do tvaru „V“ a „U“ a je dána vztahem:

$$F_K = (2 - 2,5) \cdot F_{V/U} \quad [\text{N}] \quad (14)$$

kde: F_K – kalibrovací síla [N].

4.9 Práce [6], [7], [15]

Množství práce W (viz obr. 19) potřebné k ohýbání lze obdržet:

- integrací ohýbací síly F_V , nebo F_U podle dráhy (posuvu) ohybníku h ,
- vynásobením ohýbací síly dráhou ohybníku h a koeficientem plnosti pracovního diagramu ψ^4 .

Matematicky vyjádřeno:

ad a)

$$W = \int_{h_0}^h F_{V/U} \cdot dh \quad [\text{J}] \quad (15)$$

ad b)

$$W = F_{V/U} \cdot h \cdot \psi \quad [\text{J}] \quad (16)$$

⁴ Obvyklé hodnoty při ohýbání do tvaru „V“ a „U“ leží v intervalu 0,5 – 0,65 [6], nebo 1/3 pro „U“ ohyb a 2/3 pro „V“ ohyb [15].

4.10 Materiály vhodné pro tváření [16], [19]

V technické praxi se lze nejčastěji setkat s ocelí, dále pak lehkými a barevnými kovy a jejich slitinami (např. hliník, měď a mosaz).

Norma ČSN EN 10020 definuje oceli ke tváření jako materiál, ve kterém je hmotnostní podíl železa větší, než jiných prvků a platí, že uhlíku je méně než 2 %⁵. Níže uvedená tabulka udává mezní hodnoty ocelí obvyklých jakostí podle výše uvedené normy.

Tab. 2 Mezní hodnoty pro oceli obvyklých jakostí [16]

Typ požadavku	Platný pro tloušťky	Mezní hodnota
Minimální pevnost v tahu R_m	< 16 mm	690 MPa
Minimální mez kluzu R_e	< 16 mm	360 MPa
Minimální tažnost A	< 16 mm	26 %
Maximální obsah uhlíku v tavbě	-	0,10 %
Maximální obsah fosforu v tavbě	-	0,045 %
Maximální obsah síry v tavbě	-	0,045 %

4.11 Metody ohýbání

V praxi lze materiál ohýbat za použití různých metod, kde jejich vhodnost je závislá na velikosti výrobní série, tvaru a velikosti polotovaru, případně výsledného ohybku. Jednotlivé metody jsou popsány a uvedeny v podkapitolách níže.

4.11.1 Ohýbání v nástroji [7], [8], [19], [20]

Ohýbací nástroj se nazývá ohýbadlo (viz obr. 20), jehož hlavní části jsou pohyblivý ohybník, opatřený stopkou a pevná ohybnice. V některých případech je možno opatřit nástroj přidržovačem, případně vyhazovačem.

Ohýbadla je možno rozdělit podle tvaru výsledného ohybu na ohýbadla pro ohýbání do tvaru „V“ nebo do tvaru „U“. Většinou se nekonstruují jako samostatné nástroje, ale jako nástroje sdružené.

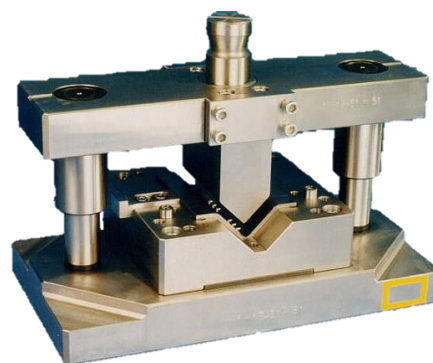
Z důvodu úspory legovaných ocelí lze některé vysoce namáhané části nahradit vyměnitelnými vložkami, čímž dochází k úspoře nákladů a zvýšení životnosti nástroje.

Ohýbadlo je vloženo do mechanického (viz obr. 21), nebo hydraulického (viz obr. 22) lisu, s jehož pomocí se realizuje vlastní proces ohýbání.

Mechanické lisy se uplatňují při ohýbání součástí menších rozměrů,



Obr. 21 Mechanický lis ŽĐAS LKJA [20]



Obr. 20 Ohýbadlo pro ohýbání do tvaru „V“ [7]



Obr. 22 Hydraulický lis ŽĐAS CTH [20]

⁵ Obecně platí, že oceli musí mít méně než 2,14 % uhlíku, což je hraniční hodnota oddělující oceli a litiny.

příčemž je nutno správně nastavit dolní úvrat' lisu. Špatné nastavení vede k velkému přetížení případně poškození nástroje a lisu.

Ohýbání v nástroji se uplatňuje především v sériové a velkosériové výrobě z důvodu vyšších nákladů na výrobu nástroje a jeho horší univerzálnosti.

4.11.2 Ohýbání v ohýbacím stroji [7], [8], [19], [21], [22]

V případech, kdy nelze součást ohýbat v nástroji, nejčastěji z důvodu délky ohybu, je možno tuto součást ohýbat v ohýbacím stroji, který je konstruován jako manuální (viz obr. 23), nebo hydraulický, někdy doplněný o numerické řízení (viz obr. 24).



Obr. 23 Manuální ohýbací stroj [21]



Obr. 24 Hydraulický ohýbací stroj s numerickým řízením [22]

Ohýbaný polotovár je pevně upnut mezi pevnou a svěrací lištu. Otočením pohyblivé čelisti dochází k ohýbání upevněného plechu. Dle odborné literatury lze takto ohýbat díly do délky až čtyř metrů [19].

4.11.3 Ohýbání v ohraňovacím stroji [6], [19], [23], [24]

Ohraňování je technologie ohýbání, využívající principu ohýbání v nástroji s tím rozdílem, že používané nástroje (viz obr. 25) jsou jednodušší a univerzálnější. Jsou upevněny na tzv. ohraňovacím lisu (viz obr. 26) a lze je snadno vyměnit dle potřeby. Tímto způsobem je možno ohýbat polotovary v délce 6 až 8 metrů. Součásti s více ohyby jsou ohýbány postupně v několika operacích.

V průmyslové praxi je možno setkat se s poloautomatickými, případně plně automatickými ohraňovacími lisami.



Obr. 25 Ohraňovací nástroje [24]



Obr. 26 Ohraňovací lis TruBend 5000 [23]

4.11.4 Zakružování v zakružovacím stroji [6], [7], [19]

Zakružování je způsob výroby válcových, případně kuželových plášťů ohýbáním pomocí tří a více válců v ruční nebo strojní zakružovačce.

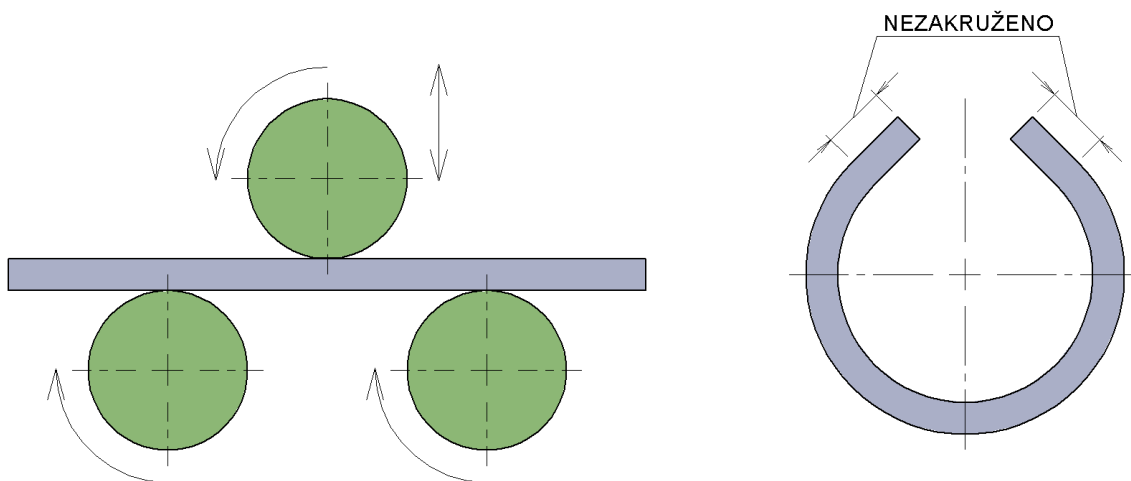
Ocelový plech do tloušťky 30 až 40 mm lze zakružovat za studena, větší tloušťky pouze za tepla. Poloměr zaoblění je možno nastavit změnou pozice válců/ů.

Jednotlivé zakružovačky se liší podle uspořádání válců a je možno je rozdělit na:

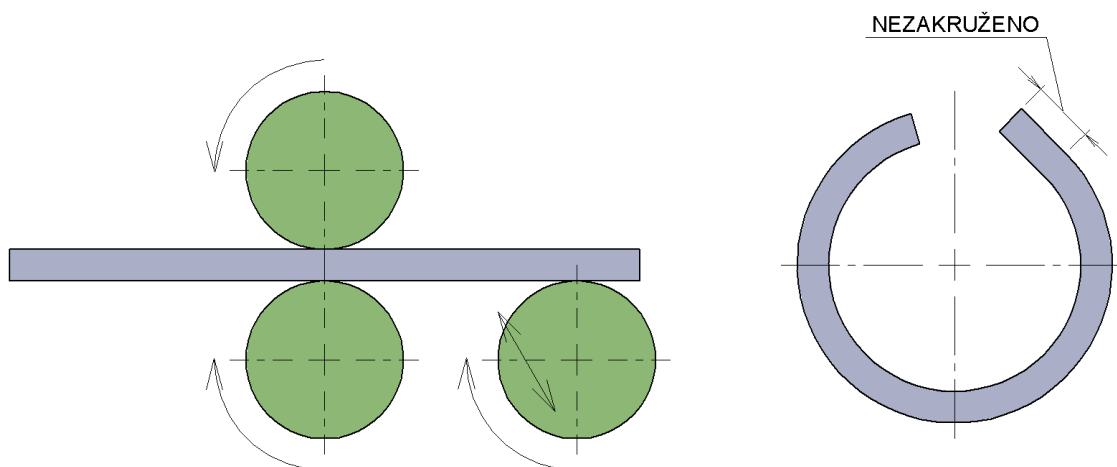
- tříválcové symetrické,
- tříválcové nesymetrické,
- čtyřválcové,
- s pryžovým válcem.

Při zakružování pomocí tříválcové symetrické zakružovačky nedochází k deformaci začátku a konce polotovaru. U zakružování tříválcové nesymetrické zakružovačky nedojde k deformaci pouze konce polotovaru a u čtyřválcové a pryžové zakružovačky dochází k deformaci po celé délce profilu.

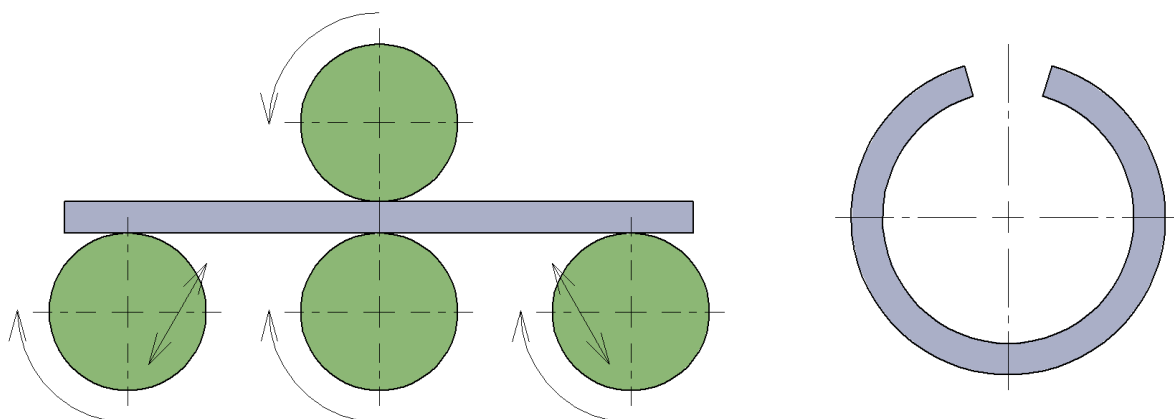
Zakružovačku s pryžovým válcem je možno použít na ohýbání tenkých plechů, kde poloměr zaoblění je závislý na stlačení pryže.



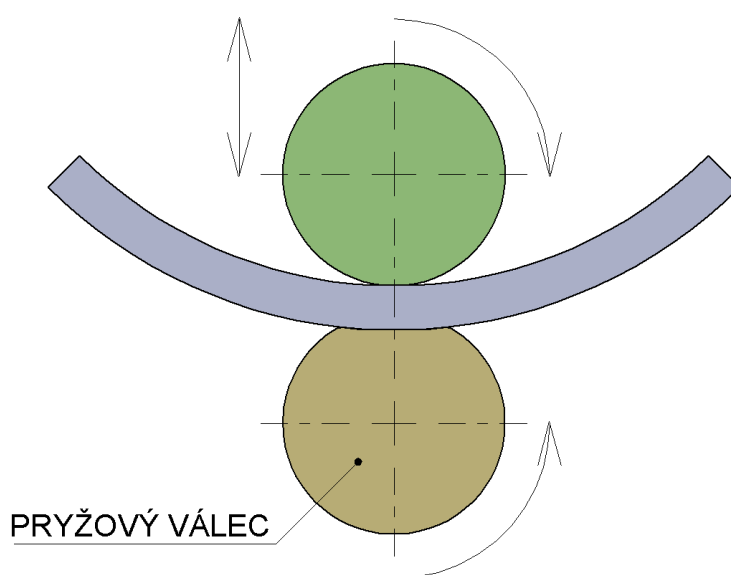
Obr. 27 Schéma tříválcové symetrické zakružovačky [6], [7]



Obr. 28 Schéma tříválcové nesymetrické zakružovačky [6], [7]



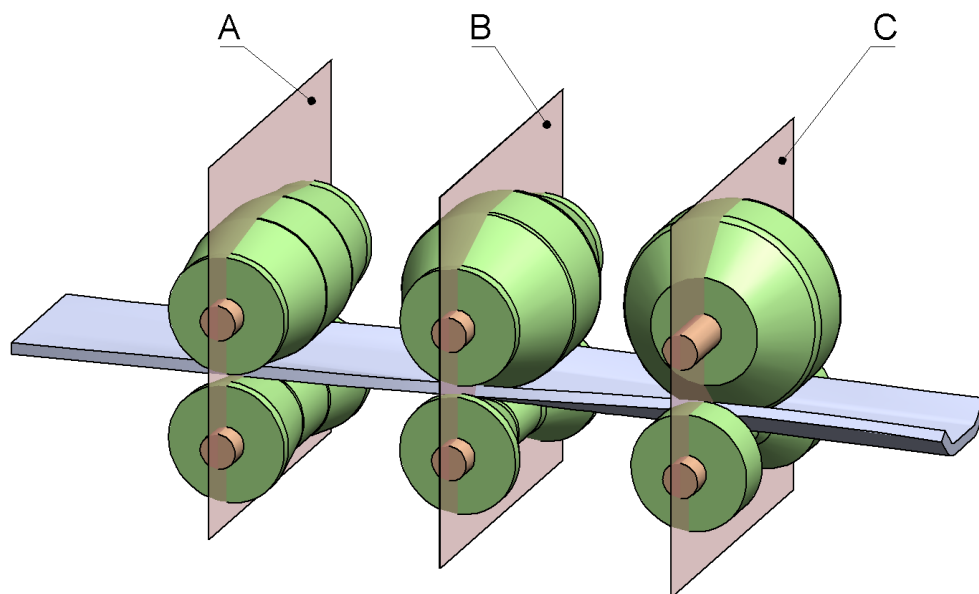
Obr. 29 - Schéma čtyřválnové zakružovačky [6], [7]



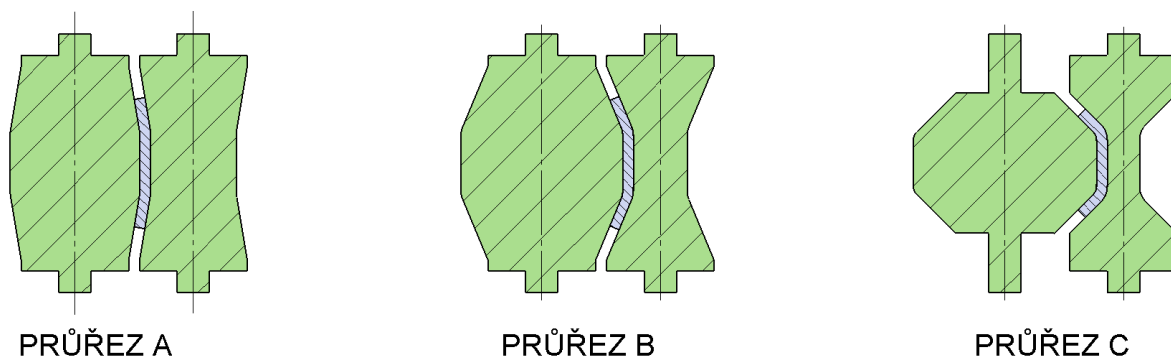
Obr. 30 Schéma pryžové zakružovačky [6], [7]

4.11.5 Ohýbání v kladkách (ohýbání válcováním) [6], [7]

Ohýbání v kladkách vychází z principu válcování, kdy je polotovár v několika krocích válcován mezi tvarovými válci a tím dochází k postupnému ohýbání na požadovaný tvar. Počet válců je závislý na složitosti dané součásti. Schéma průběhu válcování zobrazuje obr. 31 a obr. 32.



Obr. 31 Ohýbání v kladkách [7]



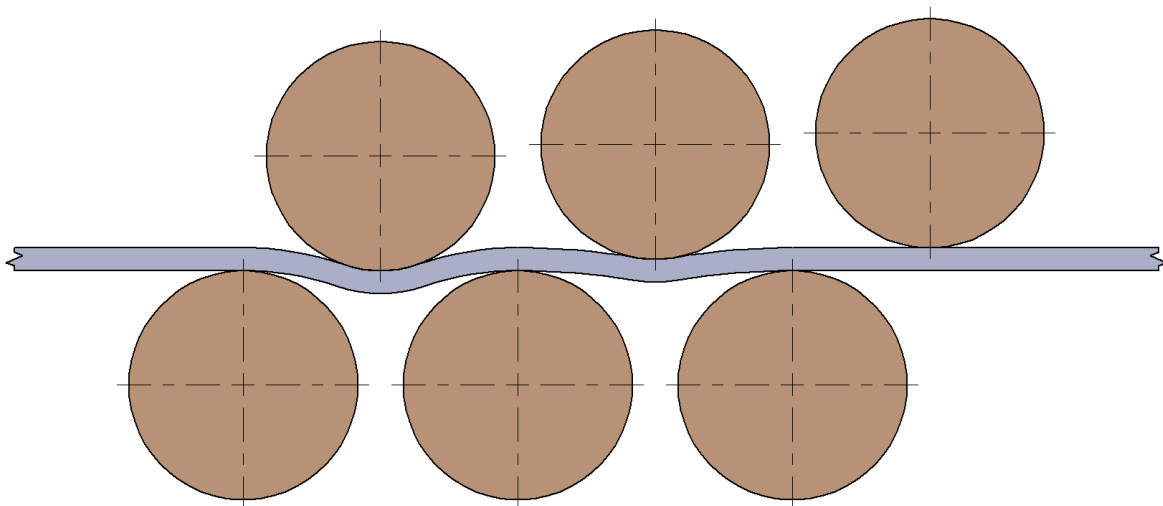
Obr. 32 Ohýbání v kladkách – průřezy v rovinách A až C [7]

4.11.6 Rovnání v kladkách a nástroji [19], [7]

Rovnání je často používáno k odstranění deformací vzniklé během manipulace nebo během výroby. Je možno jej provádět dvěma způsoby:

- a) rovnání v kladkách,
- b) rovnání v nástroji.

Rovnání v kladkách je kombinací válcování a zakružování, při kterém dochází k postupnému zvětšování rozteče mezi válci, vlivem čehož je materiál v počáteční fázi soustavně ohýbán na obě dvě strany a s postupem válcovací trati je ohýbání méně intenzivní až na konci dojde pouze k elastickému odpružení a materiál vychází rovný.

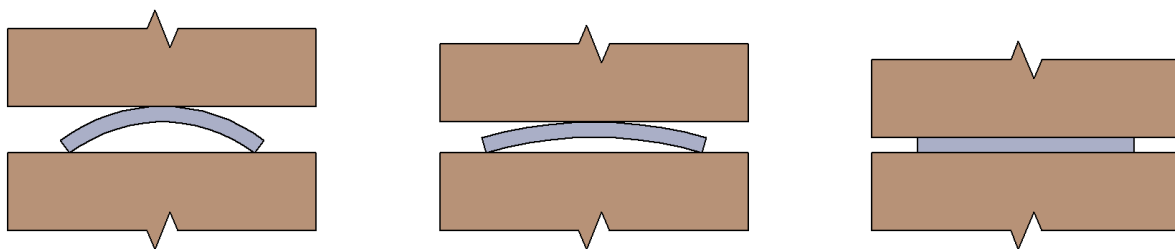


Obr. 33 Rovnání válcováním [6], [7], [8]

Rovnání v nástroji (viz obr. 34) je obměnou ohýbání v nástroji, kde se místo tvarovaného ohybníku a ohybnice používá nástroj rovný (pro rovnání tenkých a měkkých materiálů), nebo vroubkovaný (pro tvrdší materiály). Po dosednutí nástroje na polotovaru se dále zvyšuje působící síla (analogie s kalibrovací silou u ohýbání), materiál se dostává do plastického stavu a tím se redukuje zbytkové napětí od předešlého tváření. Pro rovnací sílu platí následující vztah:

$$F_R = S \cdot p \quad [\text{N}] \quad (17)$$

kde: F_R – rovnací síla [N]
 S – plocha součásti [mm²]
 p – rovnací měrný specifický tlak⁶ [MPa]



Obr. 34 Rovnání v nástroji [6], [7]

4.12 Technologická příprava výroby [6]

U ohýbaných dílů je nutno zhodnotit technologičnost z hlediska tvaru, rozměrů a materiálu polotovaru. Dále je třeba uvažovat i nedokonalosti technologie ohýbání (např. nepřesnost polohy a úhlu ohybu). Z hlediska návrhu ohýbaných dílů je třeba brát v potaz a dodržovat následující zásady:

- dovolené ztenčení plechu $\Delta s \cong 20 \%$,
- délka ramene od ohybu $l_{Rmin} \geq 3 \cdot s + r_A$ pro materiál do tloušťky 1 mm a $l_{Rmin} \geq (2,5 - 3) \cdot s$ pro materiál s tloušťkou nad 1 mm,

⁶ (50 – 100) MPa pro hladké čelisti a materiál do tloušťky 0,5 mm, (100 – 300) MPa pro čelisti s výstupky a materiál do tloušťky 2 mm a (300 – 800) MPa u tlustých materiálů.

- c) funkční prvky a otvory musí být v dostatečné vzdálenosti od ohybu,
- d) poloměr ohybu je doporučeno volit co nejmenší z důvodu menšího odpružení,
- e) velké poloměry ohybu je vhodné využít prolisy,
- f) složité tvary navrhovat s co nejmenším počtem ohybů,
- g) minimální počet ohybů s různým poloměrem,
- h) běžným ohýbáním lze dosáhnout tolerancí uvedených v tabulkách níže.

Tab. 3 Tolerance poloměru ohybu dosažitelné běžným ohýbáním, kdy $\alpha = 90^\circ$ [6]

r_A [mm]	Tolerance [mm]
< 3	$\pm 0,5$
3 – 6	± 1
6 – 20	± 2
20	± 3

Tab. 4 Tolerance úhlu ohybu α , dosažitelné běžným ohýbáním, kdy $\alpha = 90^\circ$ [6]

Materiál	r_A/s		
	< 1	1 – 2	2 – 4
Měkká ocel a mosaz $R_m = 300$ MPa	$\pm 15'$	$\pm 30'$	$\pm 1^\circ$
Středně tvrdá ocel $R_m = 400$ MPa	$\pm 30'$	$\pm 1,5^\circ$	$\pm 3^\circ$
Tvrdá ocel $R_m = 600$ MPa	-	$\pm 3^\circ$	$\pm 5^\circ$

4.12.1 Rozvinutá délka [6]

Výpočet tzv. rozvinuté délky l je podstatný z toho důvodu, že vlivem posunutí neutrální vrstvy r_N (viz kapitola 4.3) dochází při ohýbání ke zmenšování délky součástí. Pro dodržení rozměrů výsledného výrobku je nutno vypočítat délku polotovaru s uvážením vlivu posunu neutrální vrstvy.

Ohýbanou součást lze rozdělit na rovné a ohýbané úseky. Délku rovných úseků je možno stanovit přímo či nepřímo z výkresové dokumentace. Délku ohýbaného úseku lze vypočítat na základě následujícího vztahu:

$$l_N = \frac{2 \cdot \pi}{360} \cdot (180 - \alpha) \cdot r_N = \frac{\pi}{180} \cdot (180 - \alpha) \cdot (r_A + x \cdot s) \quad [\text{mm}] \quad (18)$$

Celková délka se spočítá jako součet všech rovných a ohýbaných úseků.

$$l = \sum_{i=1}^n l_i + \sum_{j=1}^m l_{Nj} \quad [\text{mm}] \quad (19)$$

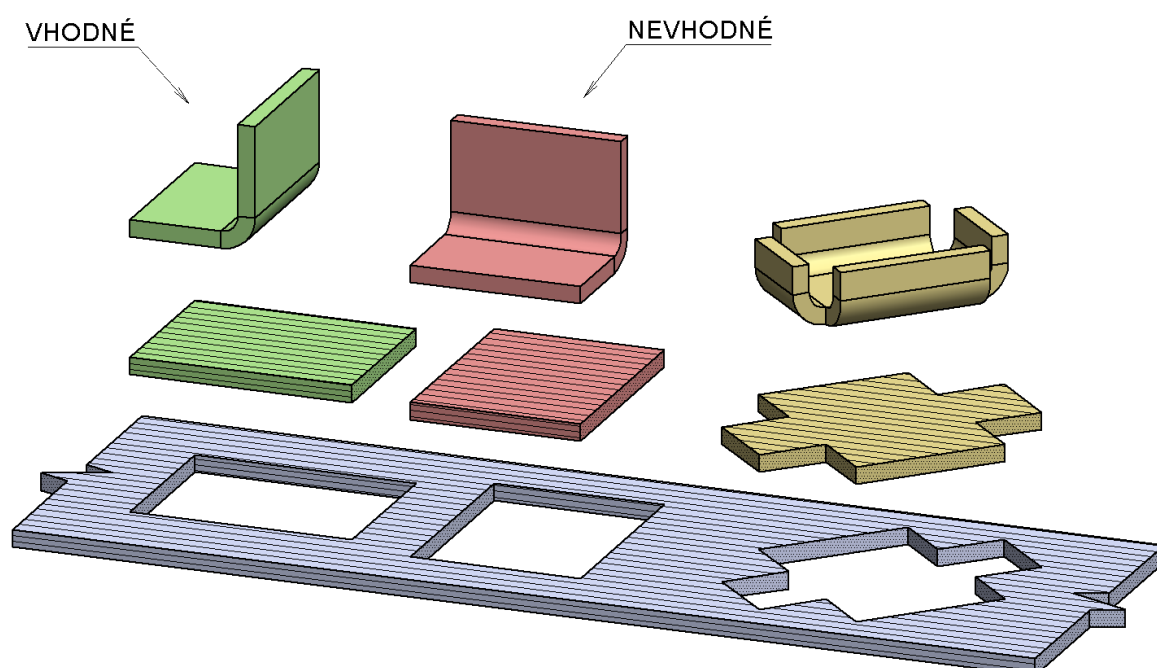
4.12.2 Délka dráhy ohybníku pro ohyb do požadovaného úhlu

Délka dráhy ohybníku je podstatná především u metody ohýbání ohraňováním (viz kapitola 4.11.3). Moderní ohraňovací lisy disponují počítačem, které potřebné výpočty provede sám na základě importované geometrie ohybu a použitých nástrojů. Pro případ potřeby analytického výpočtu (výpočet práce (viz kapitola 4.9)) byl odvozen následující vztah:

$$h = \tan\left(\frac{\gamma}{2}\right) \cdot \left(\frac{l_p}{2} - \left[(s + r_o) \cdot \tan\left(\frac{\gamma}{4}\right)\right]\right) - r_A \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{\tan\left(90 - \frac{\gamma}{2}\right)} - \frac{1}{\sqrt{\tan^2\left(90 - \frac{\gamma}{2}\right) + 1}}\right)^2 + \left(1 - \frac{\tan\left(90 - \frac{\gamma}{2}\right)}{\sqrt{\tan^2\left(90 - \frac{\gamma}{2}\right) + 1}}\right)^2} \quad [\text{mm}] \quad (20)$$

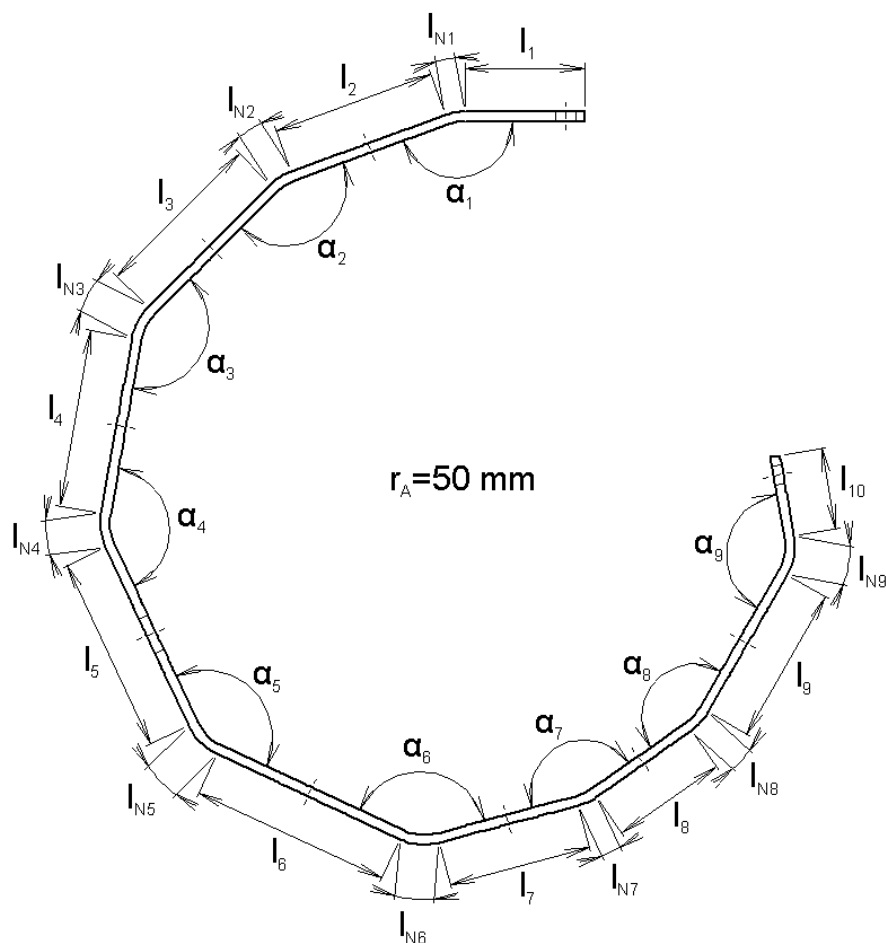
4.12.3 Orientace vláken v polotovaru [7], [15]

Vlivem anizotropie (viz kapitola 4.7) může u špatně orientovaného ohybu docházet k praskání (převážně na vnější straně ohybu). To je možno eliminovat vhodným natočením ohýbaného dílu tak, aby osa ohybu byla kolmá na směr válcování. U součásti s více ohyby v různých směrech je nutno volit natočení součásti o 45° ke směru průběhu vláken (viz obr. 35).



Obr. 35 Vliv vláken na ohýbání [7]

5 NÁVRH ŘEŠENÍ [25]



Obr. 36 Kryt dmychadla s vyznačenými délkami a úhly ohybu

Rovné úseky a úhly byly odečteny z výkresu součásti (viz tab. 5). Pro všechny poloměry ohybů platí stejná hodnota tj. 50 mm. Mechanické vlastnosti materiálu udává tabulka 6.

Tab. 5 Tabulka známých parametrů

Označení	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
l_j [mm]	125	170	180	185	205	210	150	120	165	85
α_j [°]	160	155	145	145	140	140	160	155	140	-
r_A [mm]	50									
s [mm]	10									

Tab. 6 Mechanické vlastnosti použitého materiálu (1.4541) [25]

Vlastnost	Hodnota
Modul pružnosti E	$2,0 \cdot 10^{11}$ Pa
Poissonův poměr μ	0,28
Hustota ρ	$7800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Pevnost v tahu R_m	650 MPa
Mez kluzu R_e	295 MPa
Tažnost A	43 %

5.1 Kontrola technologičnosti

5.1.1 Minimální délka ramene od místa ohybu

Protože $s > 1$, minimální délku obdržíme pomocí vztahu uvedeného v kapitole 4.12:

$$\begin{aligned}l_{Rmin} &\geq (2,5 - 3) \cdot s \\l_{Rmin} &\geq (2,5 - 3) \cdot 10 \\l_{Rmin} &\geq 25 - 30 \text{ mm}\end{aligned}$$

Pro všechny rovné úseky platí, že $l_1, l_2, \dots, l_{10} > l_{Rmin}$. Minimální délka ramene od ohybu je tedy splněna (viz tab. 5).

5.1.2 Minimální poloměr ohybu

Minimální poloměr ohybu je vypočten na základě vztahu (5), tedy:

$$\begin{aligned}r_{Amin} &= \frac{s}{2} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_{tmax}} - 1 \right) \\r_{Amin} &= \frac{10}{2} \cdot \left(\frac{1}{0.43} - 1 \right) \\r_{Amin} &= 6,63 \text{ mm}\end{aligned}$$

Protože platí, že $r_{Amin} < r_A$ nemělo by během ohýbání dojít k meznímu stavu lomu.

5.1.3 Maximální poloměr ohybu

Maximální poloměr ohybu je vypočten pomocí rovnice (7), tedy:

$$\begin{aligned}r_{Amax} &= \frac{E \cdot s}{2 \cdot R_e} \\r_{Amax} &= \frac{2 \cdot 10^{11} \cdot 0,01}{2 \cdot 295 \cdot 10^6} \\r_{Amax} &= 3,39 \text{ m}\end{aligned}$$

Protože platí, že $r_{Amax} > r_A$ nedojde po ohýbání k úplnému odpružení (navrácení do původního tvaru).

5.2 Výpočet rozvinuté délky

Celková délka rozvinuté plochy je vypočtena jako součet délek rovných a ohnutých úseků, kde délka zahnutých úseků je vypočtena na základě rovnice (19). Výsledky a jednotlivé parametry vstupující do rovnice jsou uvedeny v tabulce níže. Hodnoty koeficientu x byly určeny na základě tabulky podle Jozefa Bači pro materiál s pevností $R_m > 400 \text{ MPa}$.

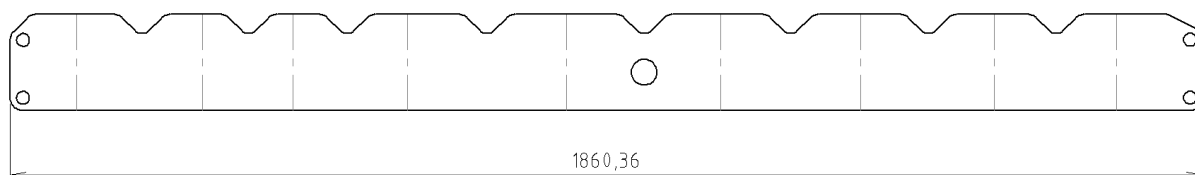
Tab. 7 Výpočet rozvinuté délky

Označení	1	2	3	4	$j [-]$				
$\alpha_j [^\circ]$	160	155	145	145	140	140	160	155	140
$r_A [\text{mm}]$	50								
$x [-]$	0,43								
$s [\text{mm}]$	10								
$l_{Nj} [\text{mm}]$	18,95	23,69	33,17	33,17	37,91	37,91	18,95	23,69	37,91

Celková rozvinutá délka je tedy:

$$l = 1595 + 265,35 = 1860,35 \text{ mm}$$

V současné době většina 3D CAD programů umožňuje rozvinutou délku vypočítat přímo ze 3D modelu. To je vhodné především při modelování složitějších součástí. Stačí jen nastavit koeficient posunutí neutrální vrstvy globálně, případně pro každý ohyb zvlášť (pokud poloměr ohybu není stejný pro všechny ohyby) a nechat součást rozvinout. Další možností je možnost importovat tabulku koeficientů do daného programu a ten si tak sám koeficient zvolí podle parametrů ohybu. Výsledný rozvin (viz obr. 37) je dále možno uložit do formátu DXF a přenést například do laseru, který danou konturu přesně vypálí. Případně připravit nástřihový plán (pokud se součást bude vyrábět stříháním).



Obr. 37 Rozvinutý tvar vyráběného dílu pomocí 3D CAD programu

5.3 Výpočet délky dráhy ohybníku

Výpočet dráhy ohybníku byl proveden na základě rovnice (20). Jednotlivé parametry vstupující do výpočtu jsou uvedeny v tabulce 8.

Tab. 8 Výpočet délky dráhy ohybníku

Označení	$j [-]$								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
l_p [mm]	133,86								
s [mm]	10								
r_o [mm]	8								
r_A [mm]	50								
γ_j [°]	20	25	35	35	40	40	20	25	40
h_j [mm]	10,75	13,19	17,80	17,80	20,00	20,00	10,75	13,19	20,00

5.4 Výpočet ohýbací síly a práce

Pro výpočet síly bude použit výpočet podle Vukoty Boljanoviče, tj. rovnice (12), protože platí, že $\frac{r_A}{s} + \frac{1}{2} = \frac{50}{10} + \frac{1}{2} = 5,5 \in \langle 5; 200 \rangle$. Výsledky a jednotlivé parametry vstupujících do výpočtu jsou uvedeny v tabulce 9.

Tab. 9 Výpočet ohýbací síly

j [mm]	b [mm]	s [mm]	R_e [MPa]	r_A [mm]	r_O [mm]	l_P [mm]	γ_j [°]	F_{Vj} [N]
1	150	10	295	50	8	133,86	20	38927,98
2							25	40390,12
3							35	43294,97
4							35	43294,97
5							40	44734,81
6							40	44734,81
7							20	38927,98
8							25	40390,12
9							40	44734,81

Maximální ohýbací síla, podle které se bude volit lis a nástroje $F_{V5} = F_{V6} = F_{V9} = 44734,81$ N.

Pro výpočet práce je využit vztah (17). Výsledky a jednotlivé parametry vstupujících do výpočtu jsou uvedeny v tabulce 10.

Tab. 10 Výpočet práce

j [-]	F_{Vj} [N]	h_j [mm]	ψ [-]	W_j [J]
1	38927,98	10,75	0,575	240,62
2	40390,12	13,19		306,33
3	43294,97	17,80		443,12
4	43294,97	17,80		443,12
5	44734,81	20,00		514,45
6	44734,81	20,00		514,45
7	38927,98	10,75		240,62
8	40390,12	13,19		306,33
9	44734,81	20,00		514,45

Celková práce potřebná pro ohýbání je rovna součtu prací jednotlivých ohybů, tj. $W = \sum_{j=1}^9 W_j = 3523,49$ J.

5.5 Volba stroje a nástroje [23]

Na základě analýzy katalogu společnosti Trumpf byla zvolena ohybnice EV W120/60°, která umožňuje ohýbání velkých poloměrů. Maximální zátěžná síla je $1600 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$, v našem případě tedy 240 kN, což je více, než maximální ohýbací síla (45 kN) vyráběného dílu. Vzdálenost podpěr $l_P = 133,86$ mm. Jako ohybník byl zvolen OW308/S, který je upevněn na adaptéru OW308/S (R50). Maximální zátěžná síla je $1500 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$, v našem případě tedy 225 kN, což je opět více, než maximální ohýbací síla (45 kN) vyráběného dílu.

Pro samotné ohýbání je volen ohraňovací lis TruBend 3066 s parametry uvedené v tabulce 11.

Tab. 11 Parametry ohraňovacího lisu TruBend 3066 [23]

Parametr	Hodnota
Lisovací síla	660 kN
Ohraňovací délka	2040 mm
Užitečná montážní výška	430 mm
Zrychlený chod	$200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$
Max. pracovní rychlost	$15 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$

5.6 Výpočet úhlu odpružení

Pro výpočet úhlu odpružení bude použit výpočet na základě rovnice (9) podle Jozefa Bači. Výsledky a jednotlivé parametry vstupující do výpočtu jsou uvedeny v tabulce níže.

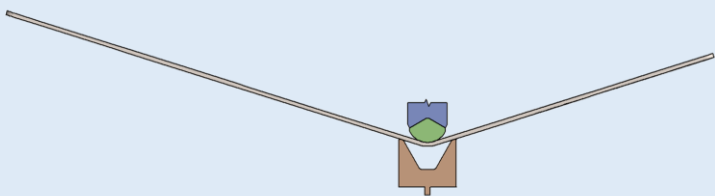
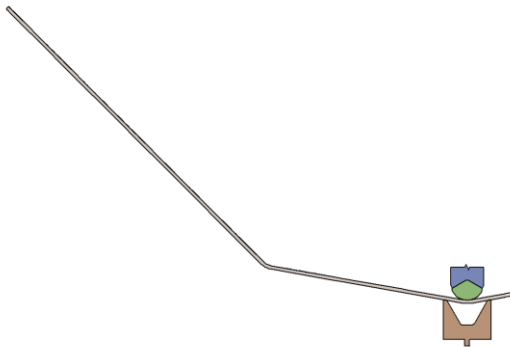
Tab. 12 Výpočet úhlu odpružení

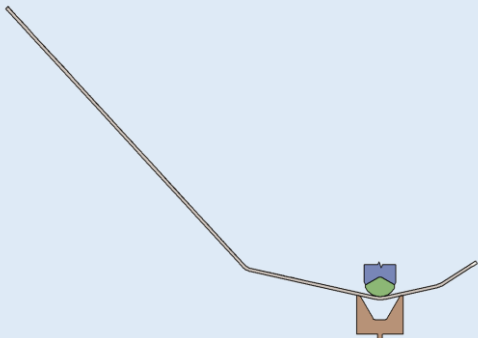
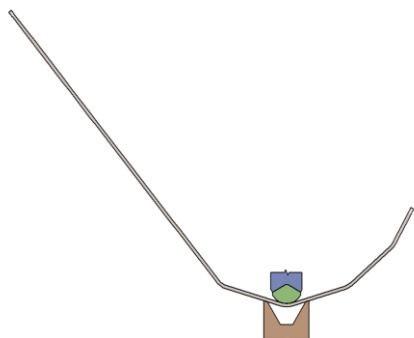
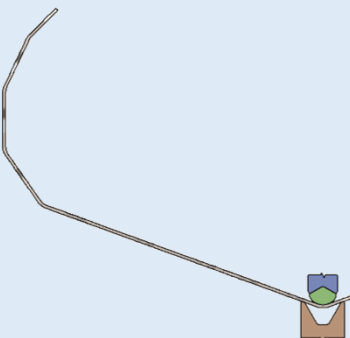
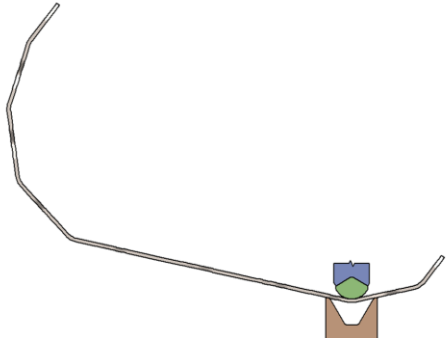
Označení	1	2	3	4	5	6	7	8	9
l_p [mm]					133,86				
x [-]					0,43				
s [mm]					10				
R_e [MPa]					295				
E [GPa]					200				
β [°]					4,26				

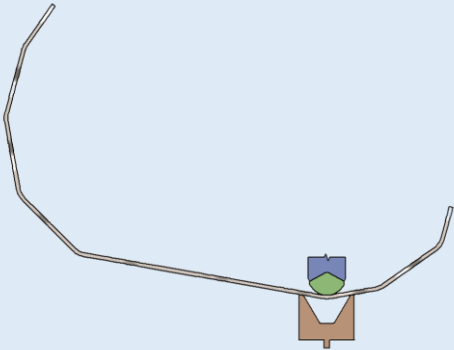
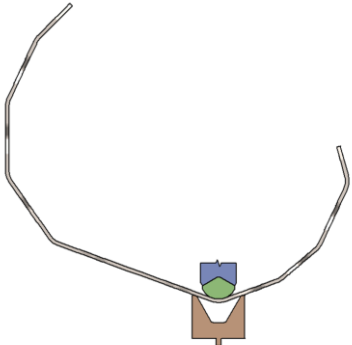
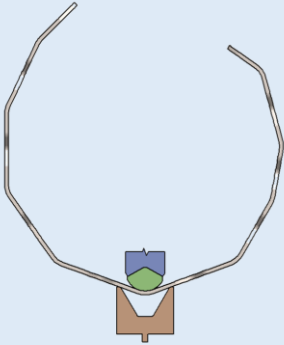
5.7 Technologický postup výroby

Na základě zvoleného stroje a nástroje byl navržen postup výroby s ohledem na rozměry stroje tak, aby nedošlo ke kolizi mezi ohýbanou součástí a ohraňovacím lisem.

Vzhledem ke hmotnosti ohýbané součásti (21 kg) je doporučeno provádět ohýbání minimálně ve dvou lidech.

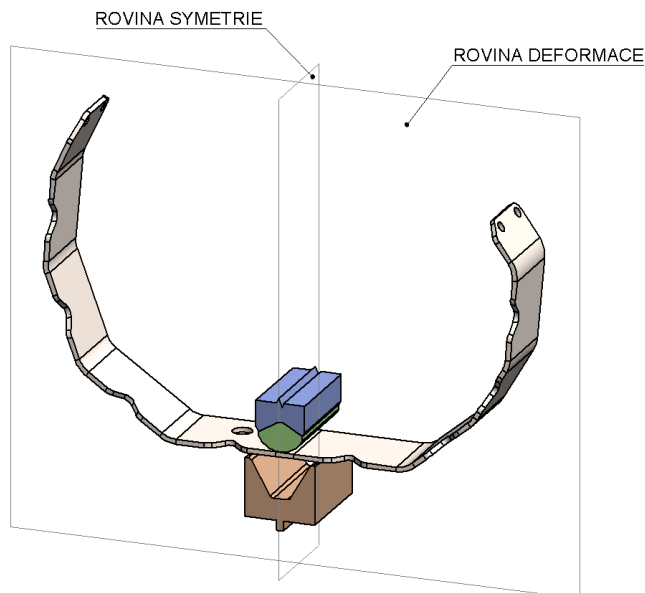
Číslo (pořadí) ohybu	α	Schéma
1	145°	
2	160°	

3	155°	
4	145°	
5	140°	
6	155°	

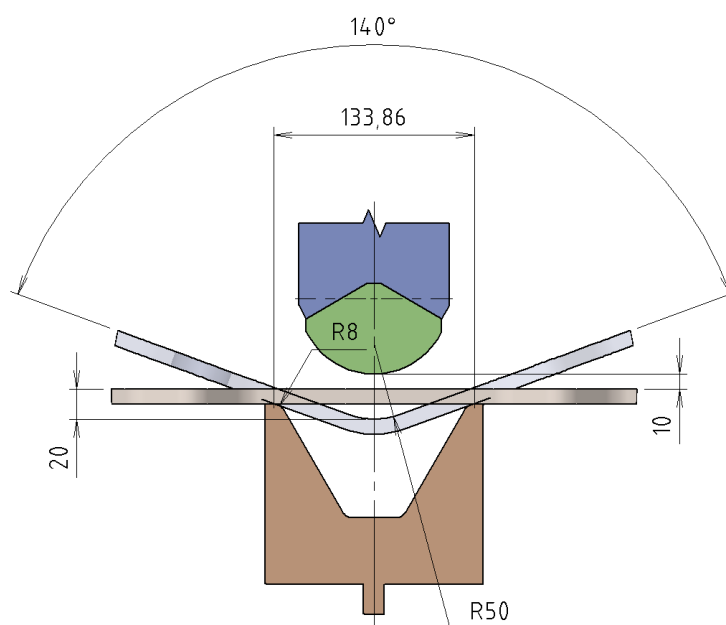
7	160°	
8	140°	
9	140°	

6 NUMERICKÁ SIMULACE PRŮBĚHU OHÝBÁNÍ

Pro lepší ilustraci výše uvedené teorie a navržené technologie byl vytvořen numerický model (viz obr. 38), který simuluje poslední tj. 9. ohyb vyráběné součásti, na kterém je možno podrobněji sledovat průběh napětí, deformace i potřebné síly a práce pro ohýbání. Podrobné parametry 9. ohybu zobrazuje obr. 39.



Obr. 38 Model pro numerickou simulaci

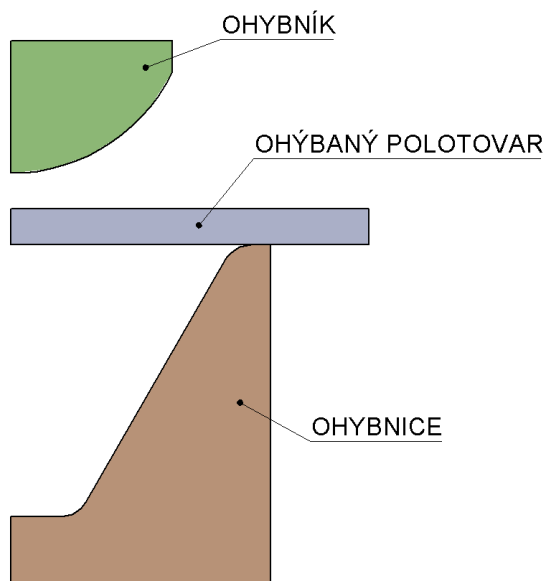


Obr. 39 Okótované parametry 9. ohybu

6.1 Geometrický model

Jelikož je výše uvedený model zbytečně složitý pro numerické řešení, bylo provedeno ekvivalentní nahrazení jednotlivých součástí. S využitím teoretických poznatků o rovině deformace (při zanedbání vlivu otvorů) a rovině symetrie (při zanedbání vlivu gravitace a ramen) se složitá 3D úloha redukovala na relativně snadno řešitelnou 2D úlohu (viz obr. 40).

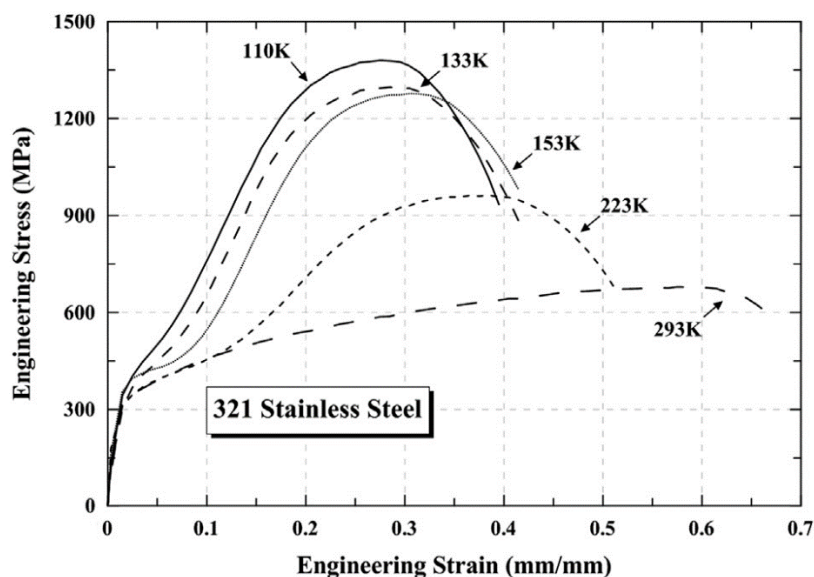
Stručný pre-processing je uveden v příloze 3. Kompletní (vygenerovaná) zpráva numerické analýzy je vzhledem k její obsáhlosti uvedena v příloženém CD.



Obr. 40 Výsledný model pro numerickou simulaci ohýbání

6.2 Materiálový model [12], [26], [27]

Na základě použitého literárního zdroje [26] byl získán smluvní tahový diagram oceli 1.4541 (viz obr. 41), který byl upraven, aby byl v souladu s tabulkou (6). Následně byly ve zvolených bodech odečteny přibližné hodnoty smluvního napětí a poměrné deformace, které byly dále přepočteny pomocí vztahu (21) a (22) na skutečné hodnoty napětí a logaritmické deformace (viz tab. 13) a dále importovány do simulačního softwaru ANSYS.



Obr. 41 Smluvní tahový diagram oceli 1.4541 (AISI 321) [26]

$$\varphi = \ln(1 \pm {}^7\varepsilon) \quad [-] \quad (21)$$

kde: φ – logaritmická deformace [-]
 ε – poměrná deformace [-]

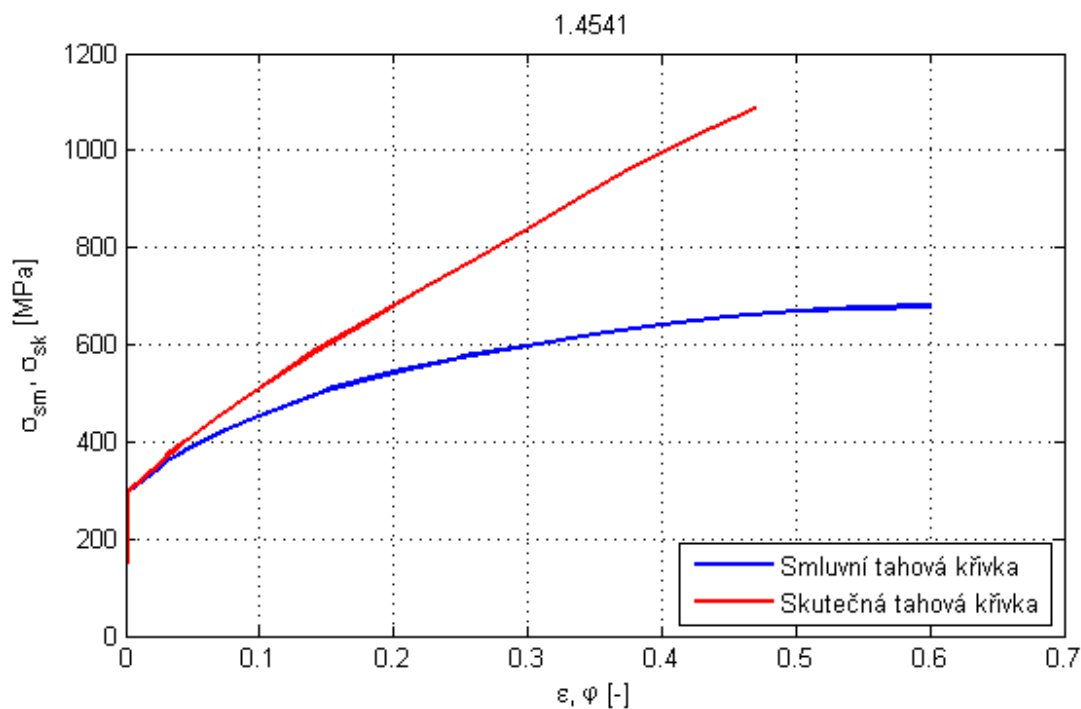
$$\sigma_{sk} = \sigma_{sm} \cdot (1 + \varepsilon) \quad [\text{MPa}] \quad (22)$$

kde: σ_{sk} – skutečné napětí [MPa]
 σ_{sm} – smluvní napětí [MPa]

Tab. 13 Přepočet odečtených hodnot ze smluvního tahového diagramu oceli 1.4541 [26]

ε [-]	σ_{sm} [MPa]	φ [-]	σ_{sk} [MPa]
0,001475	295	0,001	295
0,025	345	0,025	354
0,03125	359	0,031	370
0,0375	369	0,037	383
0,04375	379	0,043	396
0,05	389	0,049	408
0,075	424	0,072	456
0,10	455	0,095	501
0,15	507	0,140	583
0,20	543	0,182	652
0,25	574	0,223	718
0,30	598	0,262	777
0,35	621	0,300	838
0,40	642	0,336	899
0,45	658	0,372	954
0,50	670	0,405	1005
0,55	676	0,438	1048
0,60	679	0,470	1086

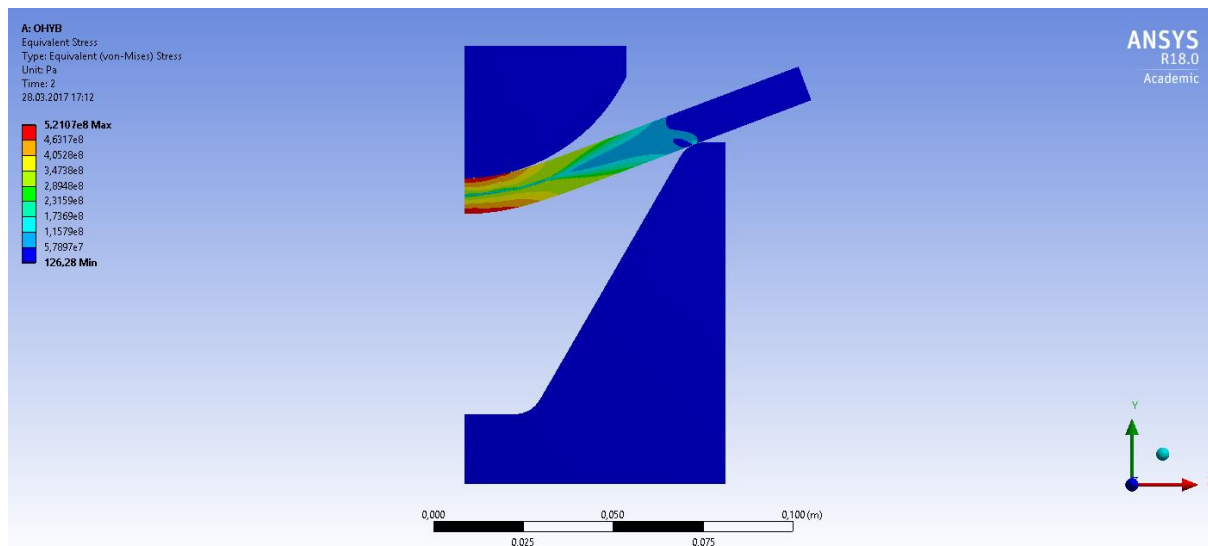
⁷ V případě tahu „+“, v případě tlaku „-“.



Obr. 42 Upravený tahový diagram oceli 1.4541 [26]

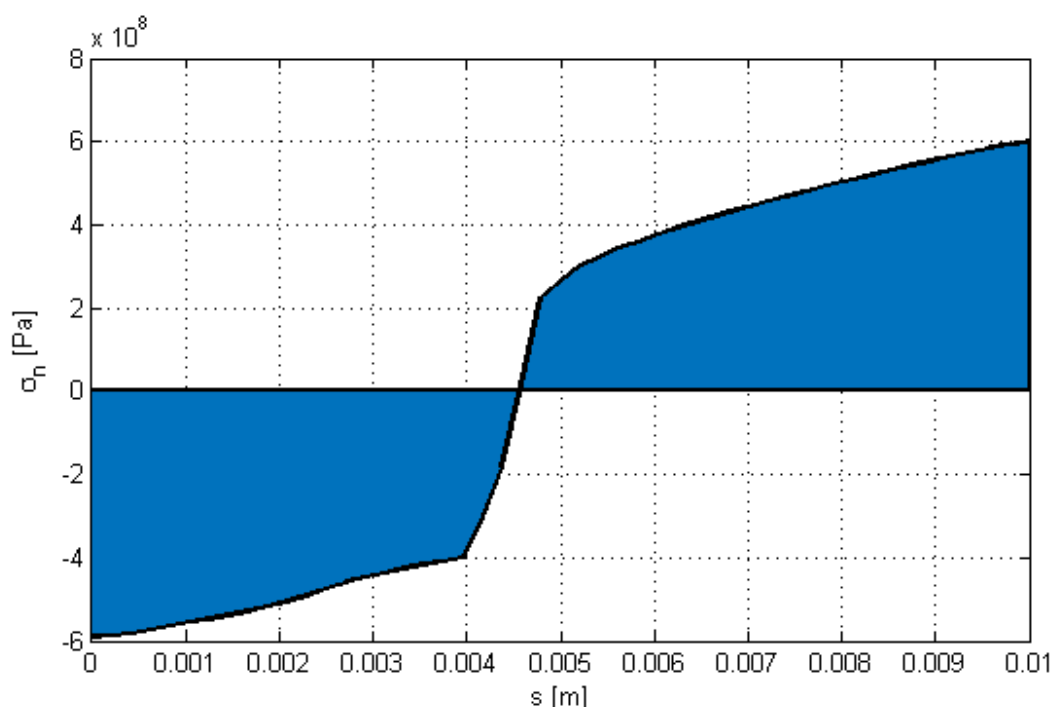
6.3 Výsledky

Na obrázku 43 je možno pozorovat průběh napětí, vypočteného na základě kritéria von Misesa v konečné fázi ohýbání, tzn. v okamžiku, kdy ohybník dosáhnul nejnižší pracovní polohy. Maximální vypočtené napětí vzniklé během ohýbání $\sigma \cong 521$ MPa. Protože platí, že $\sigma < R_m$, nedojde tedy k meznímu stavu – lomu.



Obr. 43 Napětí (von Mises) v konečné fázi ohýbání

Zkoumáním normálové složky napětí σ_n na rovinu „yz“ v místě roviny symetrie (viz obr. 44) je možno určit polohu neutrální vrstvy, tedy jak bylo zmíněno v kapitole 4.3 místo, ve kterém je napětí nulové.

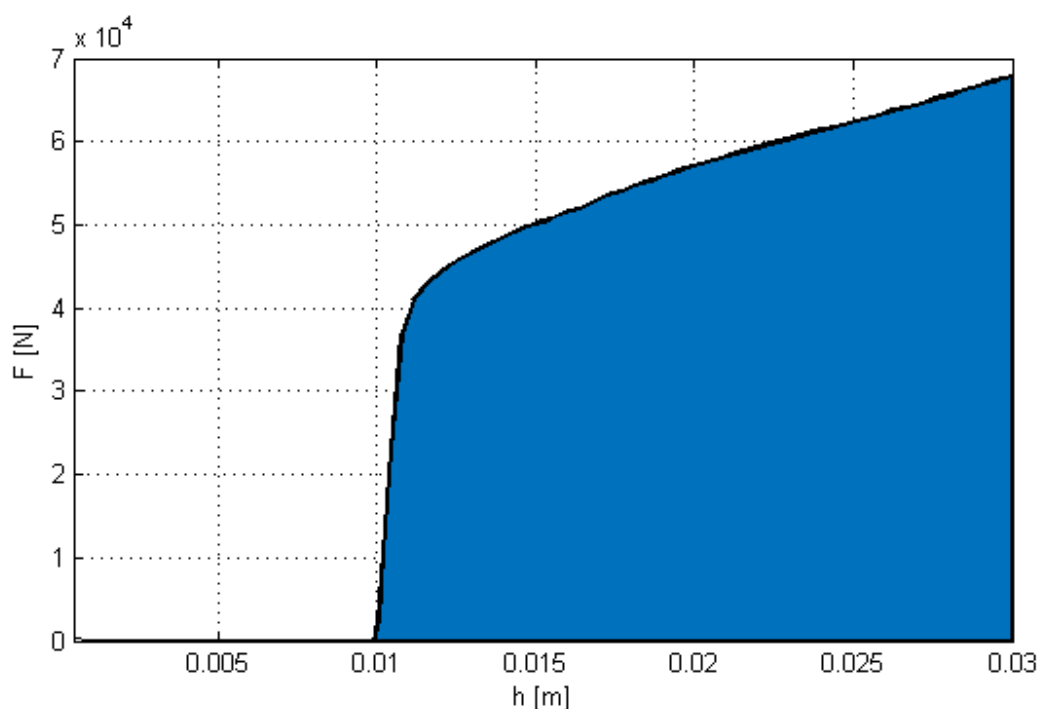


Obr. 44 Graf závislosti normálového napětí σ_n na vzdálenosti od vnitřního poloměru ohybu r_A směrem k vnějšmu poloměru ohybu r_B po tloušťce polotovaru s

V tomto případě se místo nulového napětí nachází v hloubce $s \cong 4,6$ mm. Pomocí rovnice (1) byl vypočten koeficient posunutí neutrální vrstvy, tedy $x \cong 0,46$, což je o 0,03 (7 %) více, než je tabulková hodnota.

Zkoumáním silové reakce ohybníku v závislosti na čase a následným převodem na závislost na dráze ohybníku⁸ je možno určit maximální sílu potřebnou pro ohýbání, tedy $F_V \cong 67898$ N (viz obr. 45). Odchylka od analytického výpočtu je tedy 23163,19 N (52 %). Tato výrazná odchylka je pravděpodobně způsobena odvozením analytických vztahů, které využívají zjednodušení (především v oblasti materiálového modelu a tření). V případě, kdy byla simulace provedena pro materiálový model pružněplastický bez zpevnění a bez uvažování tření, vyšla maximální ohýbací síla $F_V \cong 49642$ N, což je o 11 % více oproti analytickému výpočtu.

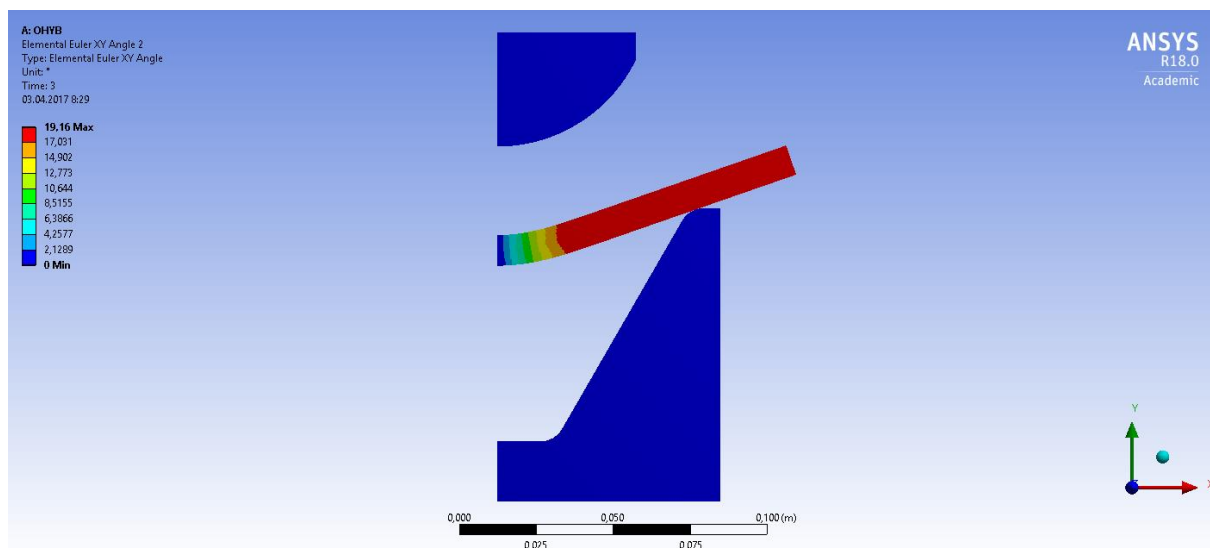
⁸ Mezi ohybníkem a ohýbaným polotovarem je na počátku ohýbání vůle – 10 mm (viz obr. 39)



Obr. 45 Graf závislosti ohýbací síly F na dráze posuvu h

Numerickou integrací výše uvedené závislosti byla získána celková práce potřebná pro ohýbání 9. ohybu, tj. $W \cong 1100$ J. Odchylka od analytického výpočtu je 585,55 J (114 %).

Poslední zkoumanou oblastí byla velikost odpružení po odlehčení (viz obr. 46). Tedy na základě níže uvedeného obrázku je výsledné odpružení $\beta = 0,84^\circ$, což je o $3,42^\circ$ (80 %) méně, než bylo vypočteno na základě analytického výpočtu. Podobný výsledek byl i u simulace bez tření a bez deformačního zpevnění.



Obr. 46 Úhel natočení vzhledem k ose „x“

Výše uvedené výsledky nemusí být přesné a jsou závislé na přesnosti numerického modelu, která je ovlivněna mírou zjednodušení a kvalitou výpočetní sítě. Stejně i pro analytické vztahy platí, že jsou závislé na zjednodušení, které daný autor použil.

V případě, kdy by se skutečnost více blížila numerickému výpočtu, není potřeba upravovat navrženou technologii výroby zadané součásti, neboť navržený stroj a nástroje jsou dostatečně

předimenzované, aby případnou vyšší zátěž vydržely. Případná korekce by se tedy týkala pouze rozvinutého tvaru a úhlu ohybu (při započtení velikosti odpružení).

6.4 Návrh experimentálního ověření [28], [29], [30]

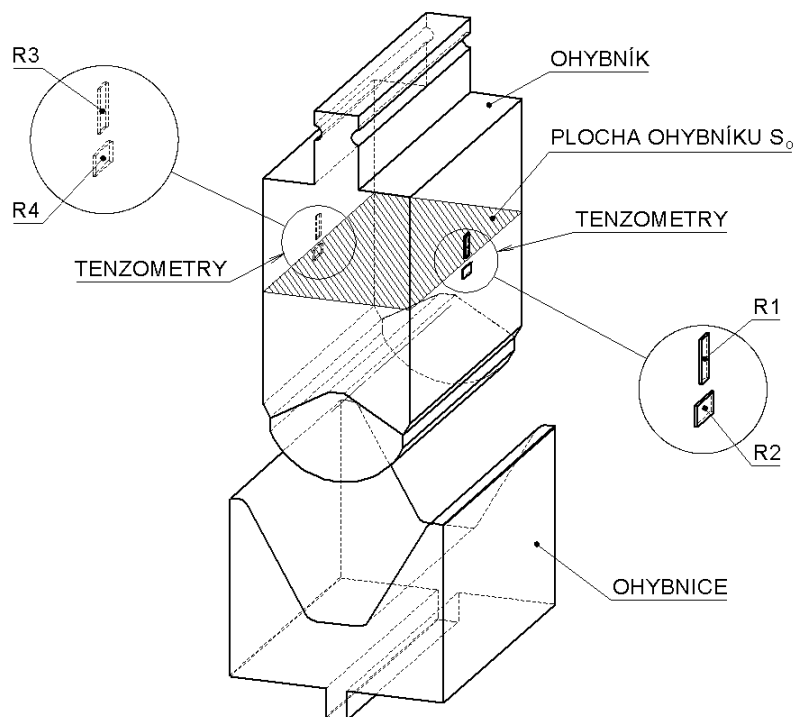
Z důvodu vysoké odchylky numerického a analytického výpočtu především v oblasti ohýbací síly je navrženo experimentální ověření za účelem zjištění skutečné ohýbací síly.

Předmětem experimentu je nepřímé měření průběhu ohýbací síly v závislosti na dráze ohybníku, a to za pomoci odporových tenzometrů, přilepených na ohybník podle obrázku 47 a zapojených do tzv. plného Wheastonova mostu (viz obr. 51), který eliminuje vliv teploty (teplotní roztažnosti) a vliv případného ohybového namáhání nástroje. Další výhodou tohoto zapojení je i vyšší citlivost, která je 2,6krát vyšší než u jednoho měřícího tenzometru.

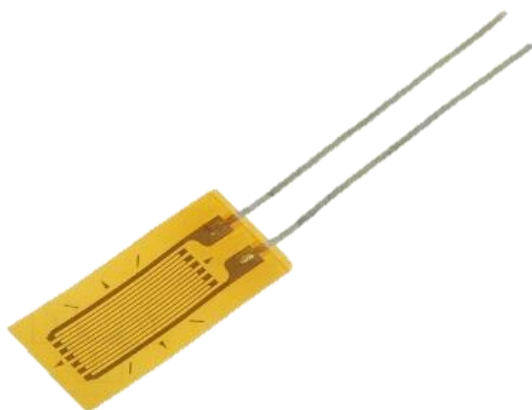
Pro měření je tedy potřeba:

- a) tenzometr (viz obr. 48),
- b) měřící zesilovač (viz obr. 49),
- c) analogový liniový zapisovač (viz obr. 49).

Celkový proces měření je uveden na obrázku 50.



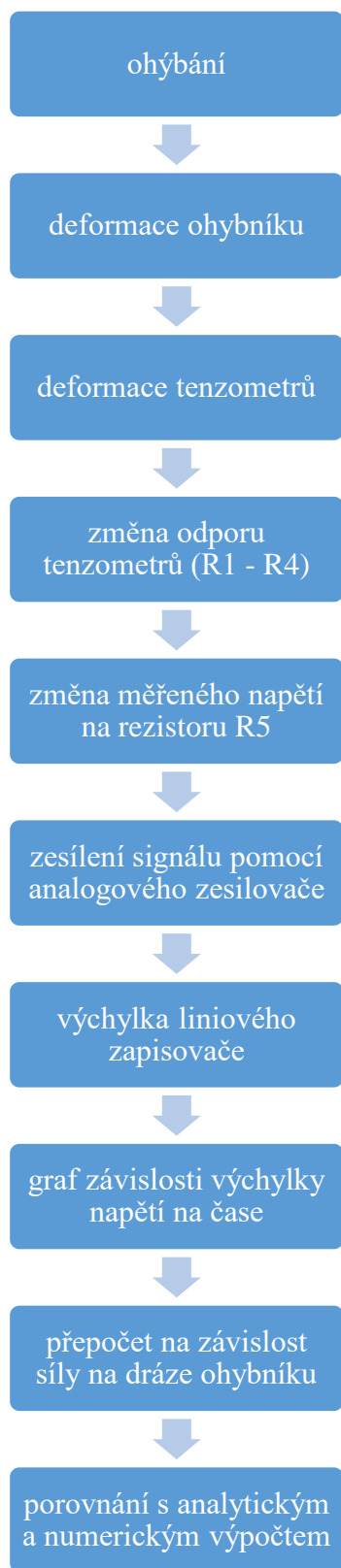
Obr. 47 Schéma umístění tenzometrů pro měření tlakového napětí



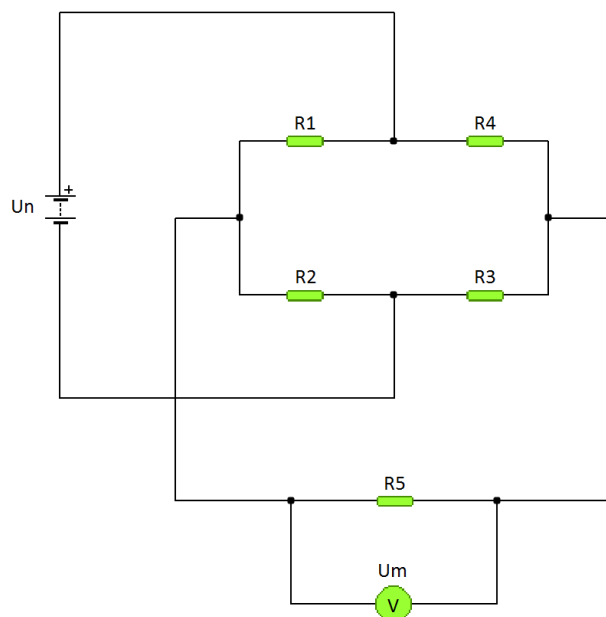
Obr. 48 Tenzometr [29]



Obr. 49 Měřící zesilovač (dole) a analogový liniový zapisovač (nahore) [30]



Obr. 50 Proces měření ohýbací síly



Obr. 51 Wheastonův most [28]

Pro napětí platí:

$$\begin{aligned}
 \frac{U_m}{U_n} &= \frac{1 + \mu}{2} \cdot \frac{\Delta R}{R} \\
 \frac{U_m}{U_n} &= \frac{1 + \mu}{2} \cdot \varepsilon \cdot k \\
 \varepsilon &= \frac{U_m}{U_n} \cdot \frac{2}{k \cdot (1 + \mu)} \\
 \frac{\sigma}{E} &= \frac{U_m}{U_n} \cdot \frac{2}{k \cdot (1 + \mu)} \\
 \sigma &= \frac{U_m}{U_n} \cdot \frac{2 \cdot E}{k \cdot (1 + \mu)} \\
 \frac{F}{S_0} &= \frac{U_m}{U_n} \cdot \frac{2 \cdot E}{k \cdot (1 + \mu)} \\
 F &= \frac{U_m}{U_n} \cdot \frac{2 \cdot E \cdot S_0}{k \cdot (1 + \mu)}
 \end{aligned} \tag{23}$$

kde: U_m – měřené napětí [V],
 U_n – napájecí napětí [V],
 R – referenční odpor tenzometru [Ω],
 ΔR – změna odporu tenzometru vlivem deformace [Ω],
 k – k – faktor tenzometru [-],
 S_0 – plocha ohybníku [m^2] (viz obr. 47).

7 ZÁVĚRY

Na základě teoretických poznatků byl navržen technologický postup výroby zadané součásti, včetně volby vhodného stroje a nástroje.

Pro uvažovanou sérii bylo ekonomicky nevýhodné navrhovat komplexní jednoúčelovou linku na výrobu zadané součásti, z toho důvodu byla jako nejvhodnější metoda zvolena ohýbání v ohraňovacím stroji. Kontrolou technologičnosti byla vyráběná součást shledána jako vyrobitelná, tzn. během ohýbání nedojde k meznímu stavu – lomu, nebo k úplnému odpružení. Na základě vypočtené ohýbací síly byl podle katalogu výrobce zvolen ohraňovací lis včetně nástroje, na kterém je možno provádět ohýbání na požadovaný tvar.

Pro lepší ilustraci a ověření teorie a navržené technologie byla provedena numerická simulace ohýbání posledního ohybu. Hlavním cílem této simulace bylo porovnat numericky vypočtené hodnoty vůči analytickým, tedy určit maximální napětí v místě ohybu s následným posouzením rizika vzniku mezního stavu, vykreslit průběh normálového napětí v místě roviny symetrie pro určení polohy neutrální vrstvy, vypočítat ohýbací sílu, práci a velikost odpružení.

Z hlediska napětí v místě ohybu simulace potvrdila, že k meznímu stavu nedojde. Určením polohy neutrální vrstvy byla zjištěna nepatrná odchylka od analytického výpočtu, která je vzhledem k její velikosti zanedbatelná. Velký rozdíl se projevil u výpočtu maximální ohýbací síly, práce a velikosti odpružení. Možným vysvětlením je, že použité analytické vztahy jsou založeny na jiném materiálovém modelu, než byl použit u simulace, proto byla provedena další simulace, tentokrát s materiálovým modelem bez deformačního zpevnění, která až na velikost odpružení potvrdila výše uvedenou domněnku. Na nízkou velikost odpružení mohla mít vliv aktivovaná stabilizace výpočtu v okamžiku odlehčení. Bez této stabilizace docházelo k nestabilnímu „kmitání“ ohýbaného polotovaru mezi ohybníkem a ohybnicí.

Při uvažování výsledků z numerické simulace, nebylo třeba měnit navržený nástroj a lis, protože dovolené zatížení udávané výrobcem dalece přesahuje velikost maximální ohýbací síly potřebné pro ohýbání vypočtené na základě numerického modelu. Případná korekce se tedy týká pouze rozvinutého tvaru a úhlu ohybu (při započtení velikosti odpružení).

Relativně velké předimenzování navrženého stroje a nástroje je možno využít pro zvýšení produktivity, kdy se bude ohýbat více dílů najednou a pro zvýšení technologických možností výrobního podniku (za předpokladu, že podnik nevyrábí pouze zadanou součást).

Z důvodu vysoké odchylky numerického a analytického výpočtu, především v oblasti ohýbací síly, bylo navrženo experimentální ověření pomocí tenzometrů za účelem zjištění skutečné ohýbací síly.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [31]

1. Tetradrachm Attica 449-404 BC cropped.jpg. In: *Wikimedia Commons* [online]. Wikimedia Commons, 2008 [cit. 2017-02-24]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tetradrachm_Attica_449-404_BC_cropped.jpg
2. PARTINGTON, Eric a Rudolf ŠTEFEC. *Materiály a jejich použití: Korozivzdorné oceli v potravinářském a nápojářském průmyslu* [online]. Luxembourg: Euro Inox, 2008 [cit. 2017-02-25]. ISBN 978-2-87997-191-9. Dostupné z: http://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro_Inox/StSt_in_FoodandBeverage_CZ.pdf
3. LanCool představuje novou počítačovou skříň PC-K6. *CZC.CZ* [online]. Příbram: CZC.CZ, 2008 [cit. 2017-02-25]. Dostupné z: <https://www.czc.cz/lancool-predstavuje-novou-pocitacovou-skrin-pc-k6/clanek>
4. Karoserie & podvozek – Dlouhá cesta. *Automobilrevue* [online]. Automotorevue, 2013 [cit. 2017-02-25]. Dostupné z: http://www.automobilrevue.cz/rubriky/automobily/technika/karoserie-podvozek-dlouha-cesta_42039.html
5. Feron: Materiálové normy. *Feron* [online]. Praha: Feron, c2004-2017 [cit. 2017-02-26]. Dostupné z: http://www.ferona.cz/cze/katalog/mat_normy.php
6. BAČA, Jozef, Jozef BÍLIK a Viktor TITTEL. *Technológia tvárnenia*. 1. vyd. Bratislava: Nakladateľstvo STU, 2010, 246 s. ISBN 9788022732420.
7. LENFELD, Petr. *Technologie II: tváření kovů, zpracování plastů* [online]. Liberec: Technická univerzita Liberec - Fakulta strojní - Katedra strojírenské technologie - Oddělení tváření kovů a plastů, [cit. 2017-03-28]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/index.htm
8. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 8021423749.
9. ČADA, Radek. *Technologie I: Studijní opora*. Ostrava, 2007. Dostupné také z: <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/TECH1/Technologie-I.pdf>
10. Plastická deformace a deformační zpevnění. In: *Ústav materiálových věd a inženýrství* [online]. Brno, 2013 [cit. 2016-11-03]. Dostupné z: http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/vyuka/fyzika_materialu/prednasky/07b_plasticka%20odeformace%20a%20odpevneni.ppt
11. Work Hardening, Strain Hardening. *The Structure and Properties of Engineering Materials* [online]. Princeton, New Jersey 08544 USA: Princeton University, [cit. 2016-11-03]. Dostupné z: <https://www.princeton.edu/~maelabs/mae324/glos324/workhardening.htm>
12. HOSFORD, William a Robert CADDELL. *Metal forming: mechanics and metallurgy*. 4th ed. New York: Cambridge University Press, 2011, 331 s. ISBN 9781107004528.
13. SUCHY, Ivana. *Handbook of Die Design*. 2nd edition. New York: McGRAW-HILL, 2006. ISBN 9780071462716.
14. BOLJANOVIC, Vukota. *Sheet metal forming processes and die design*. New York: Industrial Press, 2004. ISBN 08-311-3182-9.
15. TSCHÄTSCH, Heinz. *Metal forming practise: processes, machines, tools*. 6th ed. Berlin: Springer, 2006, 405 s. ISBN 3540332162.

16. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-720-4248-3.
17. ZHOU, Le-yu, Lei WU, Ya-zheng LIU, Xiao-jie CHENG a Jin-hong SUN. Microstructure and texture evolution of cold-rolled deep-drawing steel sheet during annealing. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*. 2013, 541-548. DOI: 10.1007/s12613-013-0763-y. ISSN 1869103x. Dostupné také z: <http://dx.doi.org/10.1007/s12613-013-0763-y>
18. RAGAI, Ihab, Duraid LAZIM a James NEMES. Anisotropy and springback in draw-bending of stainless steel 410: experimental and numerical study: experimental and numerical study. *Journal of Materials Processing Technology*. 2005, 116-127. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.08.007>. ISSN 09240136. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013604010118>
19. DVOŘÁK, Milan. *Technologie II*. 3. dopl. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2683-7.
20. ŽĎAS [online]. Žďár nad Sázavou: ŽĎAS, [cit. 2017-04-05]. Dostupné z: <http://www.zdas.cz/cs/>
21. HSBM - Manuelle Schwenkbiegemaschinen. *Metallkraft* [online]. Hallstadt: Metallkraft, [cit. 2017-02-12]. Dostupné z: <http://www.metallkraft-maschinen.de/produkte/biegen/schwenkbiegen/hsbm/index.html>
22. MSBM PRO für Blechstärken bis zu 8,0 mm - Motorische Schwenkbiegemaschinen in sehr schwerer Ausführung für Blechstärken bis zu 8,0 mm. *Metallkraft* [online]. Hallstadt: Metallkraft, [cit. 2017-02-12]. Dostupné z: <http://www.metallkraft-maschinen.de/produkte/biegemaschinen/schwenkbiegemaschinen/msbm-pro-bis-80-mm/index.html>
23. TRUMPF Česká Republika [online]. Praha: TRUMPF Česká Republika, 2017 [cit. 2017-02-13]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/cs.html>
24. Wila Trumpf Style. *Mate Precision Tooling* [online]. Anoka: Mate Precision Tooling, 2017 [cit. 2017-02-13]. Dostupné z: <https://www.mate.com/products/press-brake-tooling/wila-trumpf-style/>
25. AISI 321 (1.4541, S32100) Stainless Steel. *MakeItFrom* [online]. Toronto, 2016 [cit. 2017-02-26]. Dostupné z: <http://www.makeitfrom.com/material-properties/AISI-321-1.4541-S32100-Stainless-Steel>
26. KIM, Jeong-Hyeon, Seul-Kee KIM, Chi-Seung LEE, Myung-Hyun KIM a Jae-Myung LEE. A constitutive equation for predicting the material nonlinear behavior of AISI 316L, 321, and 347 stainless steel under low-temperature conditions. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2014, 218-225. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2014.06.008>. ISSN 00207403. Dostupné také z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020740314002252>
27. Non-linear Material Behavior: ANSYS Mechanical – Rate Independent Plasticity. In: *ENME 442 - Finite Element Analysis* [online]. Canterbury: University of Canterbury, 2010 [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: http://inside.mines.edu/~apetrell/ENME442/Labs/1301_ENME442_lab7.pdf
28. ČECH, Jaroslav, Jiří PERNIKÁŘ a Kamil PODANÝ. *Strojírenská metrologie I*. 5. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN 978-80-214-4010-4.
29. TME Czech Republic s.r.o. - Elektronické součástky [online]. Ostrava - Mariánské Hory: TME Czech Republic s.r.o. - Elektronické součástky, b.r. [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: <http://www.tme.eu/cz/>

30. PODANÝ, Kamil a Vojtěch ŘIHÁČEK. Měření neelektrických veličin pomocí tenzometrů. In: *Odbor technologie tváření kovů a plastů: Studijní opory* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně - Fakulta strojního inženýrství - Ústav strojírenské technologie - Odbor technologie tváření kovů a plastů, 2004 [cit. 2017-05-05]. Dostupné z:
http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory_soubory/mereni_velicin_tenzometrickymi_snimaci_podany_rihacek.mpeg
31. *Citace PRO* [online]. Brno, c2012-2016 [cit. 2017-04-03]. Dostupné z:
<https://www.citacepro.com/>

9 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Athénská mince, 449–404 př. n. l. [1]	9
Obr. 2 Počítačová skříň [3]	9
Obr. 3 Karoserie automobilu [4]	9
Obr. 4 Kryt dmychadla	10
Obr. 5 Schéma napjatosti a deformace při ohybu tyčí a širokých pásů [6], [8], [9]	11
Obr. 6 Ohyb do tvaru „V“ a „U“	12
Obr. 7 Teoretický průběh napětí v počáteční fázi ohybu [6], [8], [9], [12]	12
Obr. 8 Teoretický průběh napětí ve druhé fázi ohybu [6], [8], [9], [12]	13
Obr. 9 Teoretický průběh napětí v konečné fázi ohybu [6], [8], [9]	13
Obr. 10 Tahový diagram s vyznačeným deformačním zpevněním [11]	14
Obr. 11 Skutečný průběh napětí v konečné fázi ohybu [6], [8], [9]	14
Obr. 12 Graf závislosti koeficientu x na poměru r_A/s podle pevnosti materiálu (R_m) nebo přibližného výpočtu	16
Obr. 13 Parametry ohybu pro určení r_{Amin} [6], [8]	17
Obr. 14 Odpružení po ohybu [6], [8], [15]	18
Obr. 15 Parametry ohybnice [6]	19
Obr. 16 Mikrostruktura válcovaného plechu za studena (a), 60% rekrystalizace na teplotě 580 °C (b), kompletní rekrystalizace na teplotě 620 °C (c), růst zrn při 680 °C po dobu 10 hodin (d) [17]	20
Obr. 17 Deformace zrn materiálu v důsledku válcování [7]	20
Obr. 18 Graf závislosti napětí na poměrné deformaci anizotropního materiálu zatěžovaného pod úhlem 0°, 45° a 90° [18]	20
Obr. 19 Závislost síly na dráze ohybníku při ohýbání do tvaru „V“ a „U“ [6]	21
Obr. 20 Ohýbadlo pro ohýbání do tvaru „V“ [7]	23
Obr. 21 Mechanický lis ŽĐAS LKJA [20]	23
Obr. 22 Hydraulický lis ŽĐAS CTH [20]	23
Obr. 23 Manuální ohýbací stroj [21]	24
Obr. 24 Hydraulický ohýbací stroj s numerickým řízením [22]	24
Obr. 25 Ohraňovací nástroje [24]	24
Obr. 26 Ohraňovací lis TruBend 5000 [23]	24
Obr. 27 Schéma tříválcové symetrické zakružovačky [6], [7]	25
Obr. 28 Schéma tříválcové nesymetrické zakružovačky [6], [7]	25
Obr. 29 - Schéma čtyřválcové zakružovačky [6], [7]	26
Obr. 30 Schéma pryžové zakružovačky [6], [7]	26
Obr. 31 Ohýbání v kladkách [7]	27
Obr. 32 Ohýbání v kladkách – průřezy v rovinách A až C [7]	27
Obr. 33 Rovnání válcováním [6], [7], [8]	28
Obr. 34 Rovnání v nástroji [6], [7]	28
Obr. 35 Vliv vláken na ohýbání [7]	30
Obr. 36 Kryt dmychadla s vyznačenými délkami a úhly ohybu	31
Obr. 37 Rozvinutý tvar vyráběného dílu pomocí 3D CAD programu	33
Obr. 38 Model pro numerickou simulaci	38
Obr. 39 Okótované parametry 9. ohybu	38
Obr. 40 Výsledný model pro numerickou simulaci ohýbání	39
Obr. 41 Smluvní tahový diagram oceli 1.4541 (AISI 321) [26]	39
Obr. 42 Upravený tahový diagram oceli 1.4541 [26]	41
Obr. 43 Napětí (von Mises) v konečné fázi ohýbání	41
Obr. 44 Graf závislosti normálového napětí σ_n na vzdálenosti od vnitřního poloměru ohybu r_A směrem k vnějšímu poloměru ohybu r_B po tloušťce polotovaru s	42

Obr. 45 Graf závislosti ohýbací síly F na dráze posuvu h	43
Obr. 46 Úhel natočení vzhledem k ose „x“	43
Obr. 47 Schéma umístění tenzometrů pro měření tlakového napětí	44
Obr. 48 Tenzometr [29]	44
Obr. 49 Měřicí zesilovač (dole) a analogový liniový zapisovač (nahore) [30]	44
Obr. 50 Proces měření ohýbací síly	45
Obr. 51 Wheastonův most [28]	45

10 SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Úhel odpružení β pro ocel podle Ivany Suchyové	19
Tab. 2 Mezní hodnoty pro oceli obvyklých jakostí [16]	23
Tab. 3 Tolerance poloměru ohybu dosažitelné běžným ohýbáním, kdy $\alpha = 90^\circ$ [6]	29
Tab. 4 Tolerance úhlu ohybu α , dosažitelné běžným ohýbáním, kdy $\alpha = 90^\circ$ [6]	29
Tab. 5 Tabulka známých parametrů	31
Tab. 6 Mechanické vlastnosti použitého materiálu (1.4541) [25]	31
Tab. 7 Výpočet rozvinuté délky	33
Tab. 8 Výpočet délky dráhy ohybníku	33
Tab. 9 Výpočet ohýbací síly	34
Tab. 10 Výpočet práce	34
Tab. 11 Parametry ohraňovacího lisu TruBend 3066 [23]	35
Tab. 12 Výpočet úhlu odpružení	35
Tab. 13 Přepočet odečtených hodnot ze smluvního tahového diagramu oceli 1.4541 [26]	40
Tab. 14 Koeficient x podle Jozefa Bači [6]	56
Tab. 15 Koeficient x podle Ivany Suchyové [13]	56
Tab. 16 Koeficient x podle Vukoty Boljanoviče [14]	57
Tab. 17 Koeficient c podle Milana Forejta [8]	58
Tab. 18 Koeficient c podle Vukoty Boljanoviče [14]	58
Tab. 19 Koeficient c podle Heinze Tschaetscha [15]	58

11 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Veličina	Jednotka
A	Tažnost	[%], [-]
b	Šířka polotovaru	[mm]
C	Caliho konstanta	[-]
c	Technologický koeficient	[-]
E	Youngův modul (modul pružnosti v tahu)	[GPa]
F_K	Kalibrovací síla	[N]
F_R	Rovnací síla	[N]
F_U	Maximální ohýbací síla při ohýbání do tvaru „U“	[N]
F_V	Maximální ohýbací síla při ohýbání do tvaru „V“	[N]
f	Koeficient tření	[-]
h	Dráha ohybníku	[mm]
k	k – faktor tenzometru	[-]
l	Rozvinutá délka	[mm]
l_B	Délka vnější vrstvy ohybu	[mm]
l_N	Délka neutrální vrstvy ohybu	[mm]
l_P	Vzdálenost mezi podpěrami	[mm]
l_{Rmin}	Minimální délka ramene od ohybu	[mm]
p	Rovnací měrný specifický tlak	[MPa]
R	Referenční odpor tenzometru	[Ω]
ΔR	Změna odporu tenzometru vlivem deformace	[Ω]
R_e	Napětí na mezi kluzu	[MPa]
R_m	Napětí na mezi pevnosti	[MPa]
r_A	Vnitřní poloměr ohybu	[mm]
r_{Amax}	Maximální poloměr ohybu	[mm]
r_{Amin}	Minimální poloměr ohybu	[mm]
r_B	Vnější poloměr ohybu	[mm]
r_N	Poloměr neutrální vrstvy	[mm]
r_O	Poloměr zaoblení hran ohybnice	[mm]
r_S	Poloměr střední vrstvy	[mm]
S	Plocha součásti	[mm ²]
S_O	Plocha ohybníku	[m ²]
s	Výška (tloušťka) polotovaru	[mm]
t	Čas	[s]
U_m	Měřené napětí	[V]
U_n	Napájecí napětí	[V]
W	Práce	[J]
x	Koeficient posunutí neutrální vrstvy	[-]
α	Úhel ohybu	[rad], [°]
β	Úhel odpružení	[rad], [°]
γ	Doplňkový úhel ohybu	[rad], [°]
ε	Poměrná deformace	[-]
ε_{tmax}	Maximální tečná poměrná deformace v krajních vláknech ohybu	[-]
ε_{tmin}	Minimální tečná poměrná deformace v krajních vláknech ohybu	[-]
σ	Napětí	[MPa]

σ_n	Normálové napětí	[MPa]
σ_{sk}	Skutečné napětí	[MPa]
σ_{sm}	Smluvní napětí	[MPa]
φ	Logaritmická deformace	[-]
ψ	Koeficient plnosti pracovního diagramu	[-]

12 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – Tabulky koeficientu x

Příloha 2 – Tabulky koeficientu c

Příloha 3 – Stručný pre-processing numerické simulace

Příloha 4 (CD) – Kompletní (vygenerovaná) zpráva numerické simulace

Příloha 5 – Výkres součásti

Příloha 6 – Parametry navrženého stroje a nástroje

Příloha č. 1 – Tabulky koeficientu x [-]

Tab. 14 Koeficient x podle Jozefa Bači [6]

r_A/s	$x \forall (R_m \leq 400 \text{ MPa})$	$x \forall (R_m > 400 \text{ MPa})$	x podle rovnice (3)
0,1	0,25	-	0,23
0,2	0,3	-	0,29
0,25	0,32	-	0,31
0,3	0,34	-	0,32
0,4	0,36	-	0,35
0,5	0,37	-	0,37
0,6	0,38	-	0,38
0,8	0,4	-	0,40
1,0	0,41	0,35	0,41
1,2	0,42	0,36	0,42
1,5	0,44	0,37	0,44
2,0	0,45	0,38	0,45
3,0	0,46	0,40	0,46
4,0	0,47	0,42	0,47
5,0	0,48	0,43	0,48
6,0	0,49	0,44	0,48
7,0	0,49	0,45	0,48
8,0	0,50	0,46	0,49
9,0	0,50	0,47	0,49
10,0	0,50	0,47	0,49
11,0	0,50	0,48	0,49
12,0	0,50	0,48	0,49
13,0	0,50	0,49	0,49
14,0	0,50	0,49	0,49

Tab. 15 Koeficient x podle Ivany Suchyové [13]

r_A/s	x
0,1	0,32
0,25	0,34
0,5	0,38
1,0	0,42
2,0	0,44
3,0	0,46
4,0	0,47
6,0	0,48
10,0	0,48

Příloha č. 1 – Tabulky koeficientu x [-]

Tab. 16 Koeficient x podle Vukoty Boljanoviče [14]

r_A/s	x
0,1	0,23
0,2	0,29
0,3	0,32
0,4	0,35
0,5	0,37
0,8	0,40
1,0	0,41
1,5	0,44
2,0	0,45
3,0	0,46
4,0	0,47
5,0	0,48
10,0	0,50

Příloha č. 2 – Tabulky koeficientu c [-]

Tab. 17 Koeficient c podle Milana Forejta [8]

Materiál	c
Měkká ocel	0,5-0,6
Měkká mosaz	0,3-0,4
Hliník	0,35
Dural	3-6
Měď	0,25

Tab. 18 Koeficient c podle Vukoty Boljanoviče [14]

Materiál	c	
	Měkký	Tvrdý
Uhlíková ocel	0,5	3
Slitinová ocel	0,5	4
Austenitická nerezová ocel	0,5	4
Hliník	0	1,2
Hliníková slitina 2000	1,5	6
Hliníková slitina 3000	0,8	3
Hliníková slitina 4000	0,8	3
Hliníková slitina 5000	1	5
Měď	0,25	4
Bronz	0,6	2,5
Mosaz	0,4	2
Titan	0,7	3
Titanová slitina	2,5	4

Tab. 19 Koeficient c podle Heinze Tschaetscha [15]

Materiál	c			
	Měkký		Tvrdý	
	Osa ohybu kolmá na směr válcování	Osa ohybu rovnoběžná se směrem válcování	Osa ohybu kolmá na směr válcování	Osa ohybu rovnoběžná se směrem válcování
Hliník	0,01	0,3	0,3	0,8
Měď	0,01	0,3	1,0	2,0
Mosaz	0,01	0,3	0,4	0,8
St 13	0,01	0,4	0,4	0,8
C 15-C 25 St 50-St 70	0,1	0,5	0,5	1,0
C 35-C 45 St 50-St 70	0,3	0,8	0,8	1,5

Příloha č. 3 – Stručný pre-processing numerické simulace

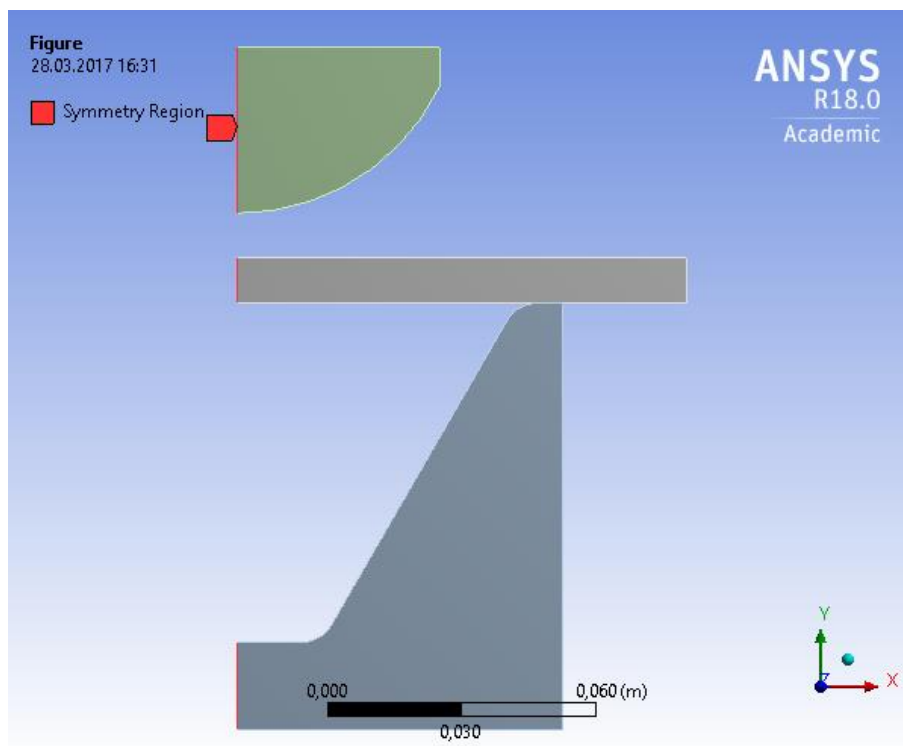
Použitá geometrie a její vlastnosti:

Object Name	OHYB		OHYB	OHYB
State	Meshed			
Graphics Properties				
Visible	Yes			
Transparency	1			
Material				
Assignment	1.4541	Steel		
Nonlinear Effects	Yes	No		
Thermal Strain Effects	Yes	No		
Statistics				
Nodes	19301	811	563	
Elements	6250	370	256	
Mesh Metric	None			
CAD Attributes				
DMSheetThickness	0,15	0,2		

Rovina symetrie:

Object Name	<i>Symmetry Region</i>
State	Fully Defined
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	3 Edges
Definition	
Scope Mode	Manual
Type	Symmetric
Coordinate System	Global Coordinate System
Symmetry Normal	X Axis
Suppressed	No

Příloha č. 3 – Stručný pre-processing numerické simulace

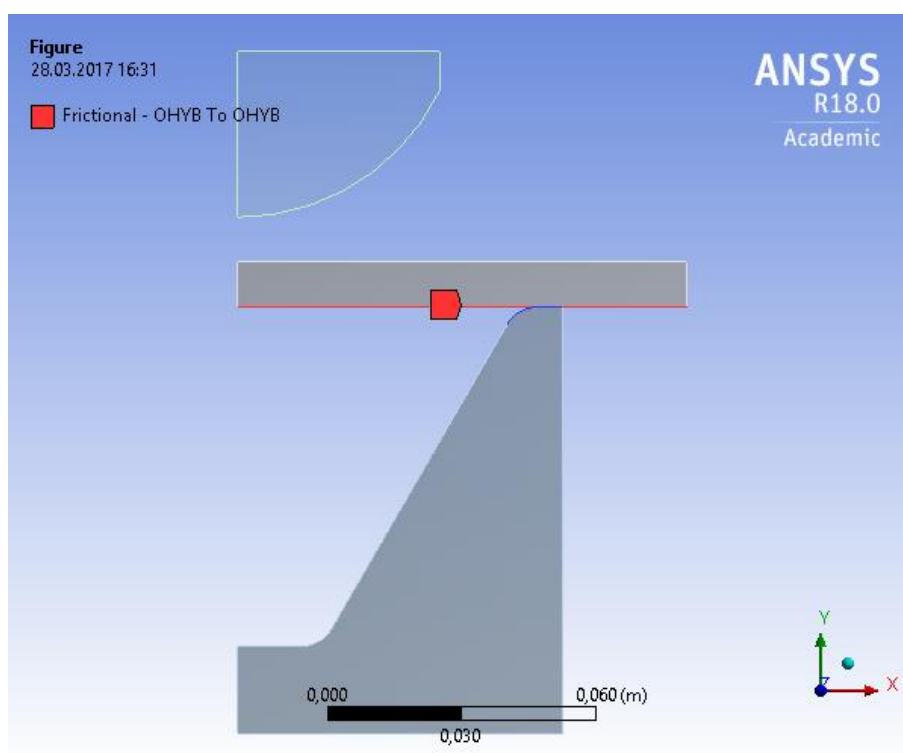
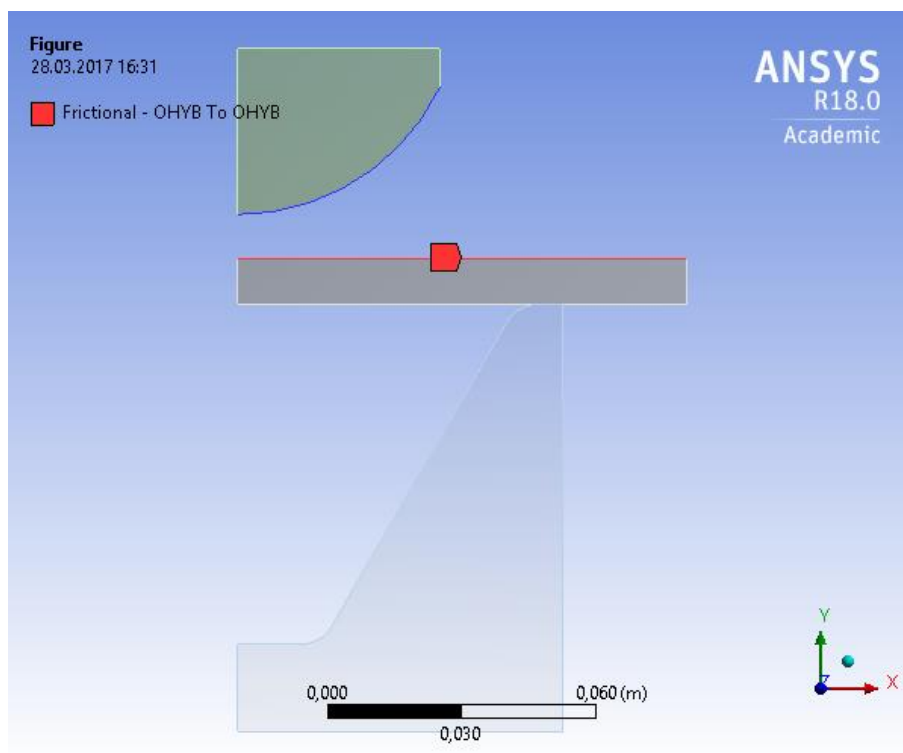


Kontakty:

Object Name	Frictional - OHYB To OHYB		Frictional - OHYB To OHYB	
State	Fully Defined			
Scope				
Scoping Method	Geometry Selection			
Contact	1 Edge			
Target	1 Edge		2 Edges	
Contact Bodies	OHYB			
Target Bodies	OHYB			
Shell Thickness Effect	No			
Definition				
Type	Frictional			
Friction Coefficient	0,15			
Scope Mode	Manual			
Behavior	Program Controlled			
Trim Contact	Program Controlled			
Suppressed	No			
Advanced				
Formulation	Program Controlled			
Detection Method	Program Controlled			
Penetration Tolerance	Program Controlled			
Elastic Slip Tolerance	Program Controlled			
Normal Stiffness	Program Controlled			
Update Stiffness	Each Iteration, Aggressive			
Stabilization Damping Factor	0,			
Pinball Region	Program Controlled			
Time Step Controls	Automatic Bisection			
Geometric Modification				
Interface Treatment	Add Offset, No Ramping			

Příloha č. 3 – Stručný pre-processing numerické simulace

Offset	0, m
Contact Geometry Correction	None
Target Geometry Correction	None



Sít:

Object Name	Mesh
-------------	------

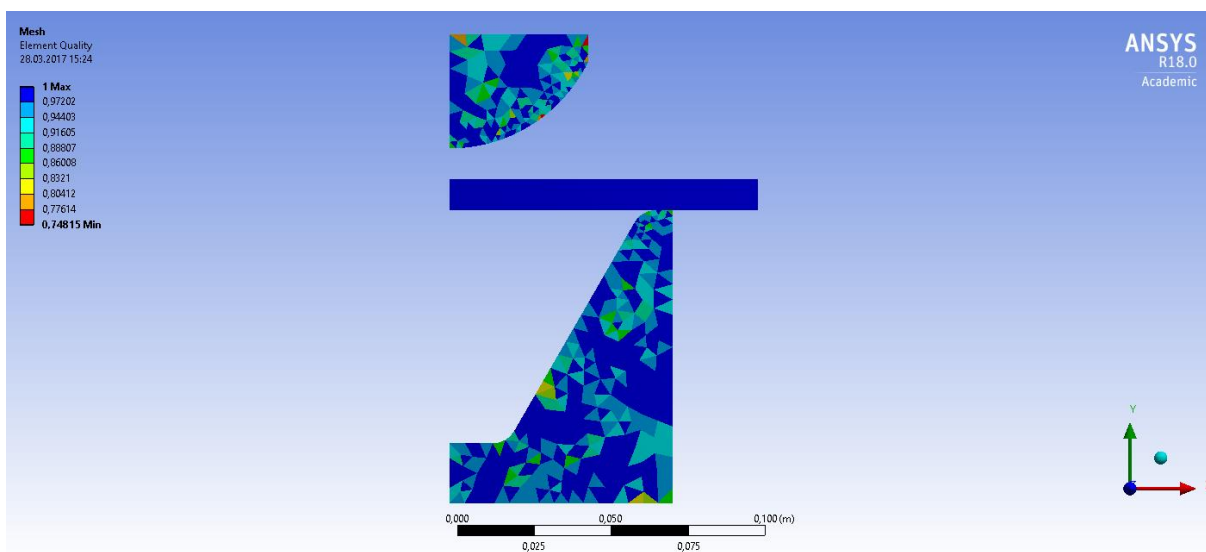
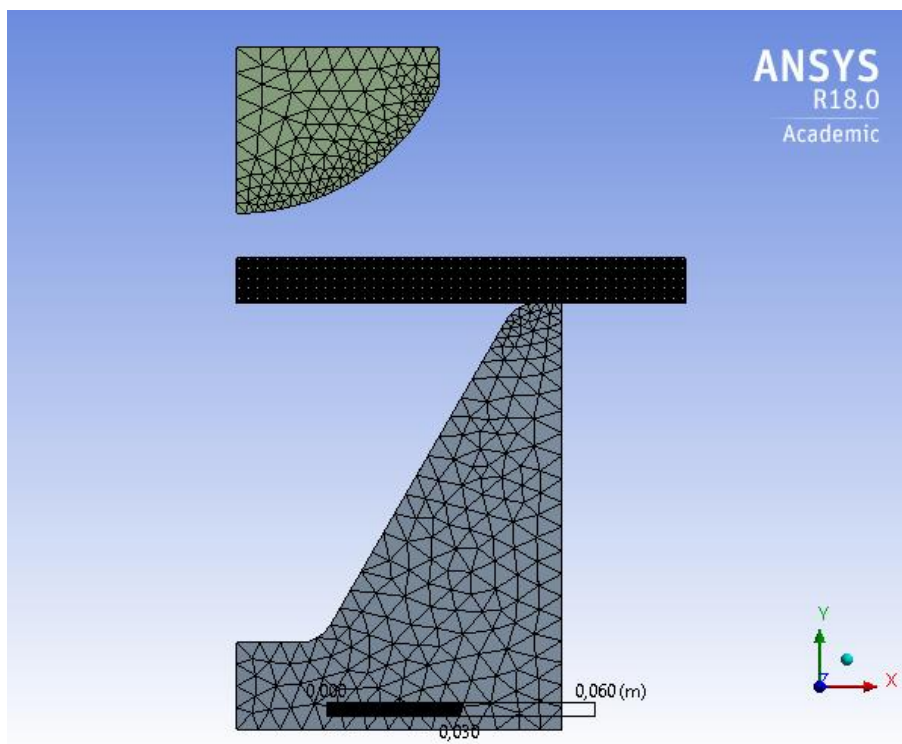
Příloha č. 3 – Stručný pre-processing numerické simulace

State	Solved
Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Relevance	0
Element Midside Nodes	Program Controlled
Sizing	
Size Function	Curvature
Relevance Center	Coarse
Initial Size Seed	Active Assembly
Span Angle Center	Coarse
Curvature Normal Angle	Default (30,0 °)
Min Size	Default (1,1292e-003 m)
Max Face Size	Default (5,6459e-003 m)
Growth Rate	Default
Automatic Mesh Based Defeaturing	On
Defeature Size	Default (5,6459e-004 m)
Minimum Edge Length	5,5718e-003 m
Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
Error Limits	Standard Mechanical
Target Quality	Default (0.050000)
Smoothing	Medium
Mesh Metric	None
Inflation	
Use Automatic Inflation	None
Inflation Option	Smooth Transition
Transition Ratio	0,272
Maximum Layers	2
Growth Rate	1,2
Inflation Algorithm	Pre
View Advanced Options	No
Statistics	
Nodes	20675
Elements	6876

Object Name	Face Sizing	Face Sizing 2	MultiZone Quad/Tri Method	All Triangles Method	Edge Sizing
State	Fully Defined				
Scope					
Scoping Method	Geometry Selection				
Geometry	1 Face	2 Faces	1 Body	2 Bodies	3 Edges
Definition					
Suppressed	No				
Type	Element Size				Element Size
Element Size	4,e-004 m	5,e-003 m			2,e-003 m
Method			MultiZone Quad/Tri	Triangles	
Surface Mesh Method			Program Controlled		
Element Midside Nodes			Use Global Setting		
Free Face Mesh Type			All Quad		

Příloha č. 3 – Stručný pre-processing numerické simulace

Advanced				
Deeature Size	Default (2,e-004 m)	Default (5,6459e-004 m)	Default(5,6459e-004 m)	
Size Function	Uniform			Uniform
Behavior	Soft			Soft
Growth Rate	Default (1,850)			Default (1,850)
Minimum Edge Length				1,e-002 m



Příloha č. 3 – Stručný pre-processing numerické simulace

Nastavení řešiče:

Object Name	Analysis Settings
State	Fully Defined
Step Controls	
Number Of Steps	3,
Current Step Number	3,
Step End Time	3, s
Auto Time Stepping	On
Define By	Time
Carry Over Time Step	Off
Initial Time Step	3,e-002 s
Minimum Time Step	3,e-006 s
Maximum Time Step	3,e-002 s
Solver Controls	
Solver Type	Program Controlled
Weak Springs	Off
Solver Pivot Checking	Program Controlled
Large Deflection	On
Inertia Relief	Off
Rotordynamics Controls	
Coriolis Effect	Off
Restart Controls	
Generate Restart Points	Program Controlled
Retain Files After Full Solve	No
Combined Restart Files	Program Controlled
Nonlinear Controls	
Newton-Raphson Option	Program Controlled
Force Convergence	Program Controlled
Moment Convergence	Program Controlled
Displacement Convergence	Program Controlled
Rotation Convergence	Program Controlled
Line Search	Program Controlled
Stabilization	Constant
--Method	Energy
--Energy Dissipation Ratio	1,e-004
--Activation For First Substep	No
--Stabilization Force Limit	0,2
Output Controls	
Stress	Yes
Strain	Yes
Nodal Forces	No
Contact Miscellaneous	No
General Miscellaneous	No
Store Results At	All Time Points
Analysis Data Management	
Solver Files Directory	C:\Users\josef\Desktop\SIMULACE\OHYB_files\dp0\SYS-5\MECH\
Future Analysis	None
Scratch Solver Files Directory	
Save MAPDL db	No
Delete Unneeded Files	Yes
Nonlinear Solution	Yes

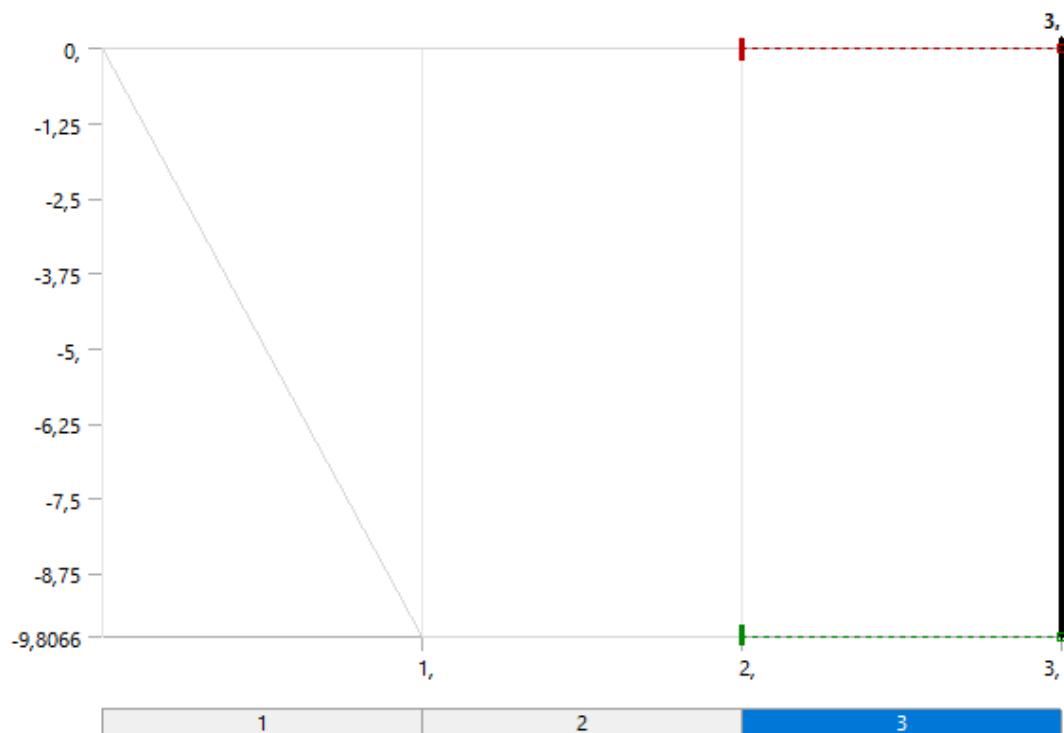
Příloha č. 3 – Stručný pre-processing numerické simulace

Solver Units	Active System
Solver Unit System	mks

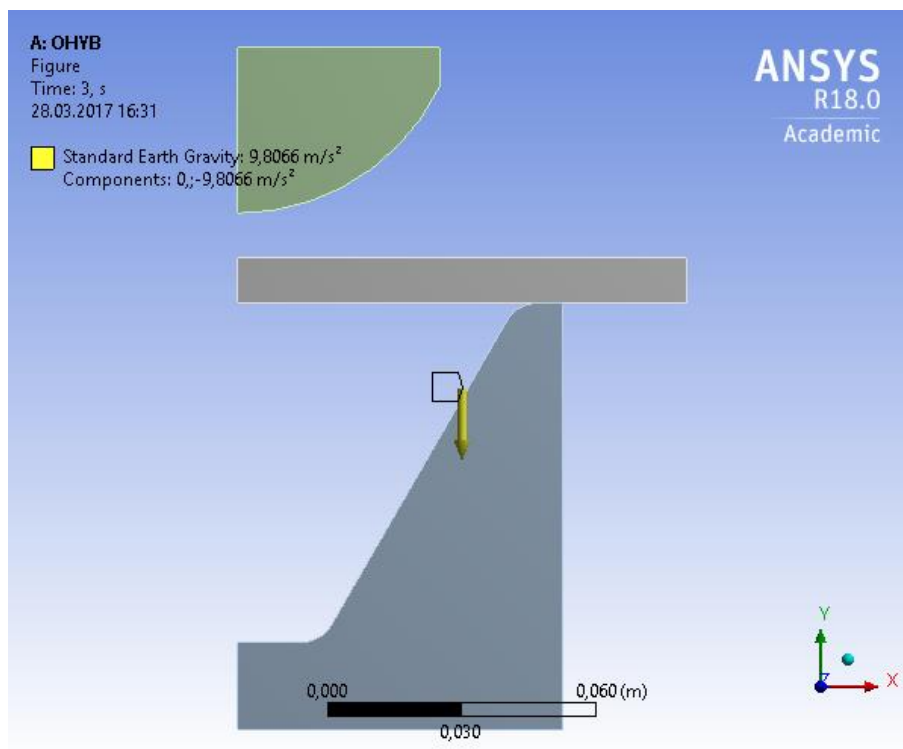
Step	Stabilization	-- Method	--Energy Dissipation Ratio	--Activation For First Substep	--Stabilization Force Limit
1	Off				
2					
3	Constant	Energy	1,e-004	No	0,2

Gravitace:

Object Name	<i>Standard Earth Gravity</i>
State	Fully Defined
Scope	
Geometry	All Bodies
Definition	
Coordinate System	Global Coordinate System
X Component	0, m/s ² (ramped)
Y Component	-9,8066 m/s ² (ramped)
Suppressed	No
Direction	-Y Direction



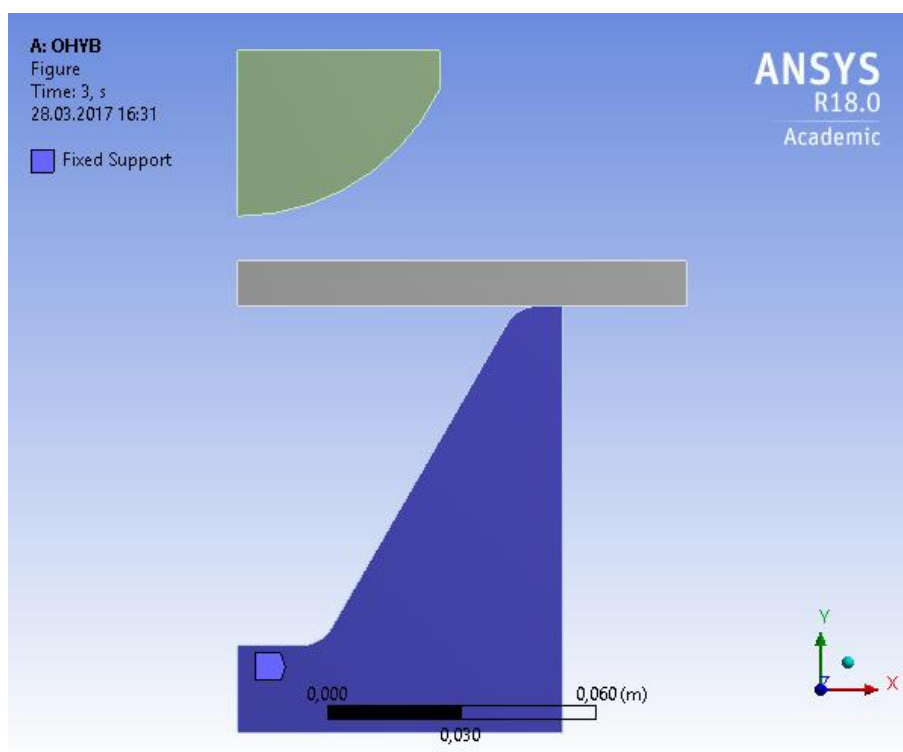
Příloha č. 3 – Stručný pre-processing numerické simulace



Vazby:

Object Name	Fixed Support	Displacement
State	Fully Defined	
Scope		
Scoping Method	Geometry Selection	
Geometry	1 Face	
Definition		
Type	Fixed Support	Displacement
Suppressed	No	
Define By		Components
Coordinate System		Global Coordinate System
X Component		Tabular Data
Y Component		Tabular Data
Tabular Data		
Independent Variable		Time

Příloha č. 3 – Stručný pre-processing numerické simulace



Steps	Time [s]	X [m]	Y [m]
1	0,	0,	0,
	1,		= -1,5e-002
2	2,	= 0,	-3,e-002
3	3,		0,

Příloha č. 3 – Stručný pre-processing numerické simulace

